

# Optimasi Sistem Panel Surya dan Baterai Untuk Meminimasi Biaya Pemakaian Energi Listrik Rumah Tangga

Osea Zebua<sup>1</sup>, I Made Ginarsa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro no.1, Bandar Lampung, 35145, Indonesia

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Jl. Majapahit no.62, Mataram, 83125, Indonesia

## ARTICLE INFO

### Article history (8 pt):

Received Mei 08, 2023

Revised Februari 22, 2024

Accepted February 23, 2024

### Keywords (8 pt):

Optimization;  
solar panels and battery systems;  
minimize ;  
electricity consumption cost:  
household;

## ABSTRACT

*The use of photovoltaic-battery energy storage systems to meet the electrical energy needs of house while reducing the cost of using electricity from the grid is increasing. Optimization of this system can be performed by optimizing the energy consumption of solar panels and batteries. This paper presents the optimization of solar panels and battery systems to minimize the cost of using electricity from the grid. Circuit models and mathematical formulations of grid-connected solar panel and battery systems were created for optimization purposes. The optimization problem is solved by using mixed-integer linear programming method found in Pyomo which is an optimization software based on the Python programming language. Data on household electricity consumption and output power from two solar panels with a capacity of 100 Wp and 200 Wp respectively were obtained from the results of simultaneous measurements for one month. The test results show that the optimization of the solar panel and battery system can reduce the cost of electricity consumption at home with optimal energy consumption from solar panels and batteries.*

Penggunaan sistem panel surya dan baterai untuk memenuhi kebutuhan energi listrik rumah sekaligus mengurangi biaya pemakaian energi listrik dari grid semakin meningkat. Optimasi sistem panel surya dan baterai ini dapat dilakukan dengan mengoptimalkan konsumsi energi dari panel surya dan baterai. Makalah ini menyajikan optimasi sistem panel surya dan baterai untuk meminimasi biaya pemakaian energi listrik dari grid. Model rangkaian dan rumusan matematis dari sistem panel surya dan baterai yang terhubung ke grid dibuat untuk keperluan optimasi. Penyelesaian masalah optimasi dilakukan dengan menggunakan metode *mixed-integer linear programming* yang terdapat pada Pyomo yakni suatu perangkat lunak optimasi berbasis bahasa pemrograman Python. Data pemakaian daya listrik rumah dan daya keluaran dari dua panel surya masing-masing dengan kapasitas 100 Wp dan 200 Wp diperoleh dari hasil pengukuran secara bersamaan selama satu bulan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa optimasi sistem panel surya dan baterai dapat mengurangi biaya pemakaian energi listrik rumah dengan konsumsi energi optimal dari panel surya dan baterai.

## Corresponding Author:

Osea Zebua, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro no.1, Bandar Lampung, 35145, Indonesia  
Email: [osea.zebua@eng.unila.ac.id](mailto:osea.zebua@eng.unila.ac.id)

## 1. PENDAHULUAN

Penggunaan energi listrik dari sumber energi terbarukan untuk kebutuhan listrik rumah semakin meningkat. Salah satu diantaranya adalah dengan menggunakan panel surya, yang dapat mensuplai energi listrik ke beban listrik rumah dan mengurangi pemakaian energi listrik yang diperoleh dari grid (jaringan penyedia listrik). Keterbatasan ketersediaan energi listrik dari panel surya dapat diatasi dengan penggunaan baterai sebagai media penyimpanan energi sekaligus penyuplai energi. Sistem ini disebut dengan

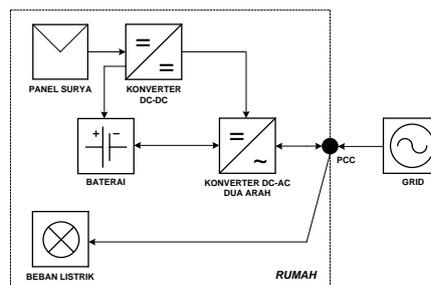
sistem panel surya dan baterai atau sistem PV-BES (*photovoltaic-battery energy storage*) atau pembangkit listrik tenaga surya hibrid [1].

Penggunaan baterai dalam sistem PV-BES mempunyai beberapa keunggulan, antara lain untuk meningkatkan nilai ekonomis [2], mengatasi beban puncak (*demand peak shaving*) [3-4], mengontrol frekuensi [5-6], mengurangi harmonisa [7], meningkatkan konsumsi daya dari panel surya (*PV self-consumption*) [8-9], memperbaiki ketahanan grid dan mengurangi ketergantungan pada grid [10-11], serta menggeser waktu pembebanan grid [12-13].

Tinjauan implementasi sistem PV-BES terhubung ke grid juga telah dilakukan di berbagai negara dengan menunjukkan nilai ekonomis yang baik [14-19]. Berbagai faktor yang berpengaruh terhadap operasi sistem PV-BES antara lain adalah karakteristik beban [20], teknologi baterai, geografi [21] dan iklim [22].

Optimasi operasi sistem PV-BES telah dilakukan untuk berbagai tujuan termasuk meminimalkan biaya pemakaian energi listrik dari grid dengan tarif listrik berdasarkan waktu penggunaan (*time of use*) dan tarif yang sama (*flat*) [23-24].

Makalah ini menyajikan optimasi sistem PV-BES terhubung ke grid untuk meminimalkan biaya pemakaian energi listrik dari grid dengan memaksimalkan konsumsi daya panel surya. Formula matematis dari sistem PV-BES terhubung ke grid dibuat untuk keperluan optimasi sesuai dengan blok diagram operasi sistem PV-BES terhubung ke grid yang ditunjukkan pada **Gambar 1**. Panel surya terhubung dengan konverter atau konverter dc-dc untuk menyimpan daya arus searah (dc) ke baterai dan selanjutnya terhubung ke inverter dua arah (*bidirectional dc-ac converter*) untuk mengubah daya dc menjadi daya ac (arus bolak-balik) dan mengirimkannya ke beban listrik dan grid [25]. Baterai terhubung ke konverter untuk menerima daya dc dari panel surya dan inverter dua arah untuk memperoleh daya dc dari grid pada saat *charging* (pengisian) dan mengirimkan daya ac ke beban listrik dan grid pada saat *discharging* (pengosongan).



**Gambar 1.** Sistem PV-BES terhubung ke grid

Data yang digunakan adalah data pemakaian daya listrik rumah dan daya keluaran dari panel surya hasil pengukuran selama satu bulan. Optimasi sistem PV-BES diselesaikan dengan metode *mixed-integer linear programming* (MILP) menggunakan Pyomo, suatu perangkat lunak optimasi berbasis bahasa pemrograman Python dan *solver* Gurobi. Optimasi tidak memperhitungkan biaya investasi dari sistem PV-BES sehingga tidak mempertimbangkan kelayakan ekonomis dari sistem PV-BES. Optimasi dilakukan dalam operasi sistem PV-BESS untuk meminimisasi fungsi objektif yakni biaya listrik yang digunakan dari grid. Hasil simulasi menunjukkan bahwa optimasi sistem PV-BES dapat lebih mengurangi biaya penggunaan energi listrik dari grid.

## 2. METODE

### 2.1. Pengambilan Data

Data pemakaian daya listrik rumah dengan kapasitas daya pasang 900VA diperoleh dari hasil pengukuran menggunakan sensor tegangan ZMPT101B dan sensor arus SCT013-000 yang terhubung ke mikrokontroler Arduino. Waktu pengambilan data dilakukan setiap 10 menit dan diatur dengan menggunakan RTC *data logger* DS1307. Data tegangan, arus, daya listrik serta waktu kemudian disimpan dalam kartu memori SD (*SD memory card*). Rangkaian pengujian pengambilan data beban listrik ditunjukkan pada **Gambar 2**.

Data daya listrik arus searah yang dihasilkan oleh panel surya diperoleh dengan menggunakan sensor arus dan sensor tegangan. Waktu saat pengambilan data juga diatur menggunakan RTC *datalogger* DS1307. Pengambilan data dilakukan setiap 10 menit dan disimpan ke kartu memori SD. Panel surya yang digunakan

masing-masing mempunyai kapasitas 100 Wp dan 200 Wp. Pengambilan data pemakaian daya listrik dan daya keluaran panel surya dilakukan bersamaan selama satu bulan (31 hari).



**Gambar 2.** Rangkaian pengambilan data beban listrik

## 2.2. Formulasi Matematis Optimasi Sistem PV-BES Terhubung ke Grid

Optimasi sistem PV-BES untuk meminimalkan biaya pemakaian energi listrik dari grid selama waktu pengujian  $t$ ,  $Elcost_t$ , dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\min Elcost_t = \min \sum_{j=1}^t E_{grid_j} * P_e \quad (1)$$

dimana  $E_{grid_j}$  adalah pemakaian energi listrik dari grid (dalam kWh) dan  $P_e$  adalah tarif listrik (dalam Rp./kWh). Fungsi objektif yang dicapai harus memenuhi batasan-batasan, antara lain:

a. Batasan-batasan dari baterai:

- i. Keadaan pengisian baterai setiap waktu,  $SOC_j$ , harus berada di antara nilai minimum,  $SOC_{min}$ , dan maksimumnya,  $SOC_{max}$ , yakni:

$$SOC_{min} \leq SOC_j \leq SOC_{max} \quad (2)$$

- ii. Energi pengisian baterai setiap waktu,  $E_{ch_j}$ , harus sama dengan penjumlahan energi yang mengalir dari panel surya ke baterai,  $E_{PVtobatt_j}$  dan energi yang mengalir dari grid ke baterai,  $E_{gridtobatt_j}$ , yakni:

$$E_{ch_j} = E_{PVtobatt_j} + E_{gridtobatt_j} \quad (3)$$

- iii. Energi pengosongan baterai setiap waktu,  $E_{disch_j}$ , harus lebih kecil atau sama dengan perkalian antara perbedaan antara nilai SOC pada waktu sebelumnya,  $SOC_{j-1}$ , dan nilai SOC minimum dengan kapasitas nominal baterai,  $C_{batt-nom}$ , yakni:

$$E_{disch_j} \leq (SOC_{j-1} - SOC_{min}) \times C_{batt-nom} \quad (4)$$

- iv. Pengisian baterai dan pengosongan baterai tidak dapat dilakukan secara bersamaan.

b. Batasan-batasan keseimbangan energi:

- i. Energi grid setiap waktu,  $E_{grid_j}$ , harus sama dengan penjumlahan dari energi grid yang disalurkan ke beban,  $E_{gridtoload_j}$ , energi grid yang disalurkan ke baterai,  $E_{gridtobatt_j}$ , dan rugi-rugi energi pada inverter akibat energi yang mengalir dari grid,  $E_{invloss-grid_j}$ , yakni:

$$E_{grid_j} = E_{gridtoload_j} + E_{gridtobatt_j} + E_{invloss-grid_j} \quad (5)$$

- ii. Energi dari panel surya setiap waktu,  $E_{PV_j}$ , harus sama dengan penjumlahan dari energi yang mengalir dari panel surya ke beban,  $E_{PVtoload_j}$ , energi yang mengalir dari panel surya ke baterai,  $E_{PVtobatt_j}$ , energi yang terpotong pada konverter,  $E_{PVtocurt_j}$ , rugi-rugi energi pada konverter dc-dc,  $E_{convloss_j}$ , dan rugi-rugi energi pada inverter akibat energi yang mengalir dari panel surya,  $E_{invloss-PV_j}$ , yakni:

$$E_{PV_j} = E_{PVtoload_j} + E_{PVtobatt_j} + E_{PVtocurt_j} + E_{convloss_j} + E_{invloss-PV_j} \quad (6)$$

- iii. Energi beban listrik setiap waktu,  $E_{load_j}$ , harus sama dengan penjumlahan dari energi yang mengalir dari panel surya ke beban, energi yang mengalir dari grid ke beban, dan energi yang mengalir dari baterai ke beban,  $E_{disch_j} * \eta_{inv}$ , yakni:

$$E_{load_j} = E_{PVtoload_j} + E_{gridtoload_j} + E_{disch_j} * \eta_{inv} \quad (7)$$

dimana  $\eta_{inv}$  adalah efisiensi inverter.

- iv. Keadaan energi pengisian (*state of charge*) setiap waktu,  $SOC_j$ , harus sama dengan penjumlahan dari SOC pada waktu sebelumnya,  $SOC_{j-1}$ , dan perbandingan energi pengisian terhadap kapasitas nominal baterai,  $E_{ch_j}/C_{batt-nom}$ , dikurangi perbandingan energi pengosongan terhadap kapasitas nominal baterai,  $E_{disch_j}/C_{batt-nom}$ , dan perbandingan rugi-rugi energi pada baterai terhadap kapasitas nominal baterai,  $E_{batt-loss_j}/C_{batt-nom}$ , yakni:

$$SOC_j = \frac{(SOC_{j-1} \times C_{batt-nom} + E_{ch_j} - E_{disch_j} - E_{batt-loss_j})}{C_{batt-nom}} \quad (8)$$

- v. Energi pengosongan setiap waktu,  $E_{disch_j}$ , harus sama dengan penjumlahan dari energi baterai yang disalurkan ke beban,  $E_{batttoload_j}$  dan rugi-rugi energi pada inverter,  $E_{invloss-batt_j}$ :

$$E_{disch_j} = E_{batttoload_j} + E_{invloss-batt_j} \quad (9)$$

- c. Batasan-batasan dari rugi-rugi energi konverter dan inverter:

- i. Rugi-rugi pada konverter,  $E_{convloss_j}$ , merupakan hasil perkalian antara penjumlahan dari energi panel surya yang mengalir ke beban, energi panel surya yang mengalir ke baterai, energi panel surya yang mengalir ke grid dan rugi-rugi pada inverter akibat energi yang mengalir dari panel surya,  $E_{invloss-PV_j}$ , dengan faktor  $(1 - \eta_{conv})$ , yakni:

$$E_{convloss_j} = (E_{PVtoload_j} + E_{PVtobatt_j} + E_{PVtograd_j} + E_{invloss-PV_j}) \times (1 - \eta_{conv}) \quad (10)$$

dimana  $\eta_{conv}$  adalah efisiensi konverter.

- ii. Rugi-rugi energi pada inverter dua arah,  $E_{biinvloss_j}$ , merupakan penjumlahan dari rugi-rugi energi pada inverter akibat energi listrik yang mengalir dari panel surya,  $E_{invloss-PV_j}$ , rugi-rugi energi pada inverter akibat energi listrik yang mengalir dari grid,  $E_{invloss-grid_j}$ , dan rugi-rugi energi pada inverter akibat energi listrik yang mengalir dari baterai,  $E_{invloss-batt_j}$ , yakni:

$$E_{biinvloss_j} = E_{invloss-PV_j} + E_{invloss-grid_j} + E_{invloss-batt_j} \quad (11)$$

- iii. Rugi-rugi energi pada inverter akibat energi listrik yang mengalir dari panel surya merupakan perkalian antara faktor  $\left(\frac{1-\eta_{inv}}{\eta_{inv}}\right)$  dengan penjumlahan energi listrik panel surya yang mengalir ke beban dan energi panel surya yang mengalir menuju grid, yakni:

$$E_{invloss-PV_j} = (E_{PVtoload_j} + E_{PVtograd_j}) \times \left(\frac{1-\eta_{inv}}{\eta_{inv}}\right) \quad (12)$$

- iv. Rugi-rugi energi pada inverter akibat energi listrik yang mengalir dari grid pada setiap waktu merupakan perkalian antara energi yang mengalir dari grid ke baterai dengan faktor  $\left(\frac{1-\eta_{inv}}{\eta_{inv}}\right)$ , yakni:

$$E_{invloss-grid_j} = E_{gridtobatt_j} \times \left(\frac{1-\eta_{inv}}{\eta_{inv}}\right) \quad (13)$$

- v. Rugi-rugi energi pada inverter akibat energi yang mengalir dari baterai pada setiap waktu merupakan perkalian energi pengosongan baterai dengan faktor  $(1 - \eta_{inv})$ , yakni:

$$E_{invloss-batt_j} = E_{disch_j} \times (1 - \eta_{inv}) \quad (14)$$

- vi. Rugi-rugi energi pada baterai pada setiap waktu,  $E_{battloss_j}$ , merupakan perkalian antara energi pengisian baterai dan faktor  $(1 - \eta_{batt})$ , yakni:

$$E_{battloss_j} = E_{ch_j} \times (1 - \eta_{batt}) \quad (15)$$

dimana  $\eta_{batt}$  adalah efisiensi baterai.

- d. Batasan-batasan daya:

- i. Daya pengisian setiap waktu,  $P_{ch_j}$ , harus lebih kecil atau sama dengan daya pengisian maksimum,  $P_{char-max}$ , yakni:

$$P_{ch_j} \leq P_{char-max} \quad (16)$$

- ii. Daya pengosongan baterai setiap waktu,  $P_{disch_j}$ , harus lebih kecil dari daya pengosongan maksimum,  $P_{disch-max}$ , yakni:

$$P_{disch_j} \leq P_{disch-max} \quad (17)$$

- iii. Daya panel surya setiap waktu,  $P_{PV_j}$ , harus lebih kecil atau sama dengan daya konverter,  $P_{conv}$ , yakni:

$$P_{PV_j} \leq P_{conv} \quad (18)$$

- iv. Jumlah dari daya setiap waktu yang mengalir dari panel surya ke grid, daya setiap waktu yang mengalir dari panel surya ke beban, rugi-rugi daya pada inverter akibat daya yang mengalir dari panel surya dan rugi-rugi daya pada inverter akibat daya yang mengalir dari baterai, harus lebih kecil atau sama dengan rating daya inverter,  $P_{inv}$ , yakni:

$$P_{PVtogrid_j} + P_{PVto load_j} + P_{invloss-PV_j} + P_{invloss-batt_j} \leq P_{inv} \quad (19)$$

- v. Jumlah daya yang mengalir dari grid ke baterai dan rugi-rugi daya pada inverter akibat daya yang mengalir dari grid harus lebih kecil atau sama dengan rating daya inverter, yakni:

$$P_{gridto batt_j} + P_{invloss-grid_j} \leq P_{inv} \quad (20)$$

Dari persamaan (1) sampai dengan persamaan (20), formulasi permasalahan dengan metode MILP dapat diringkaskan sebagai berikut:

Fungsi objektif yang akan dicapai adalah minimasi biaya pemakaian energi listrik dari grid ( $Elcost_t$ ). Parameter-parameter yang digunakan,  $h$ , adalah:

$$h = (P_{inv}, P_{conv}, \eta_{batt}, \eta_{inv}, \eta_{conv}, P_{PV_j}, E_{load_j}, P_{char-max}, P_{disch-max}, SOC_{max}, SOC_{min}, P_e, C_{batt-nom})$$

Variabel integer atau variabel yang tergantung pada nilai integer,  $x_{int}$ , antara lain adalah:

$$x_{int} = (= P_{ch_j}, E_{ch_j}, P_{disch_j}, E_{disch_j})$$

Selebihnya adalah variabel bukan integer.

Nilai-nilai parameter dari masing-masing komponen model untuk setiap studi kasus diringkaskan pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Nilai Parameter Komponen Model Sistem PV-BES

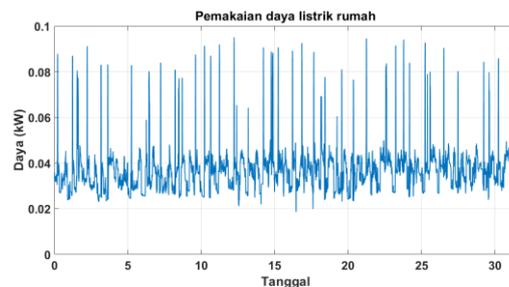
Kasus	Komponen	Nilai	
I	Panel Surya	Kapasitas 100 Wp	
	Konverter	Kapasitas 0,1 kW	
	Inverter dua arah		$\eta_{conv} = 0,98$
			$P_{inv} = 0,2 \text{ kW}$
	Baterai		$\eta_{inv} = 0,95$
			$C_{batt-nom} = 1 \text{ kWh}$
		$\eta_{batt} = 0,98$	
		$P_{char-max} = 0,4 \text{ kW}$	
		$P_{disch-max} = 0,4 \text{ kW}$	
II	Panel Surya	Kapasitas 200 Wp	
	Konverter	Kapasitas 0,2 kW	
	Inverter dua arah		$\eta_{conv} = 0,98$
			$P_{inv} = 0,3 \text{ kW}$
	Baterai		$\eta_{inv} = 0,95$
			$C_{batt-nom} = 1 \text{ kWh}$
		$\eta_{batt} = 0,98$	
		$P_{char-max} = 0,4 \text{ kW}$	
		$P_{disch-max} = 0,4 \text{ kW}$	

Biaya listrik per kWh,  $P_e$ , yang digunakan pada pengujian ini adalah sebesar Rp. 1.352 yang merupakan biaya listrik per kWh golongan tarif R-1/TR dengan batas daya pasang 900VA.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

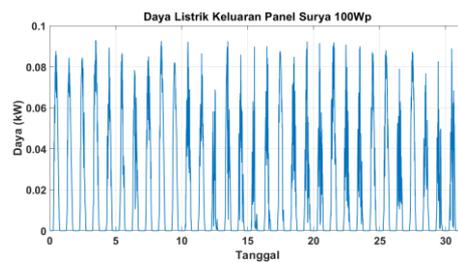
#### 3.1. Hasil Pengukuran

Data hasil pengukuran pemakaian daya listrik rumah ditunjukkan pada **Gambar 3**. Jumlah total pemakaian energi listrik rumah selama sebulan adalah 164,81 kWh.

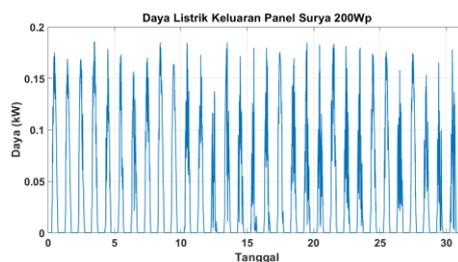


**Gambar 3.** Hasil pengukuran pemakaian daya listrik rumah

Data hasil pengukuran daya keluaran dari panel surya 100 Wp dan 200 Wp masing-masing ditunjukkan pada **Gambar 4** dan **Gambar 5**. Energi listrik total yang dihasilkan oleh masing-masing panel surya adalah 13,169 kWh dan 26,339 kWh.



**Gambar 4.** Hasil pengukuran daya keluaran panel surya 100 Wp



**Gambar 5.** Hasil pengukuran daya keluaran panel surya 200 Wp

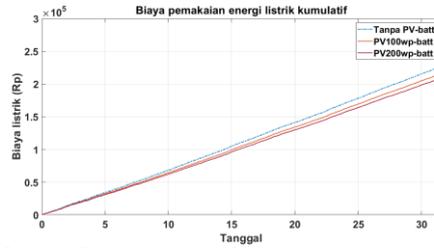
#### 3.2 Hasil Optimasi

Biaya pemakaian energi listrik dari grid hasil optimasi sistem PV-BES untuk kasus I adalah sebesar Rp. 211.902 dengan pemakaian energi listrik dari grid sebesar 156,73 kWh, dan untuk kasus II adalah sebesar Rp. 205.243 dengan pemakaian energi dari grid adalah sebesar 151,81 kWh. Biaya pemakaian energi listrik tanpa sistem PV-BES adalah sebesar Rp. 222.824 dengan pemakaian energi listrik sebesar 164,81 kWh. Sehingga terdapat pengurangan biaya pemakaian energi listrik sebesar Rp. 10.922 atau 4,9% untuk kasus I dan Rp.17.581 atau 7,89% untuk kasus II.

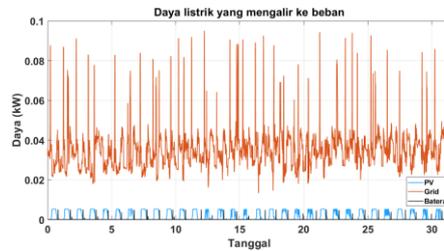
Biaya pemakaian energi listrik secara kumulatif selama satu bulan baik tanpa sistem panel surya dan baterai, serta dengan menggunakan dua panel surya dan baterai ditunjukkan pada **Gambar 6**.

Energi listrik yang disuplai ke beban masih didominasi oleh energi listrik dari grid seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 7** dan **Gambar 8**. Selain disebabkan oleh nilai pemakaian energi listrik dari rumah yang lebih besar dari energi yang dihasilkan oleh panel surya dengan kapasitas yang ditentukan, hal ini juga disebabkan oleh grid yang mensuplai beban di saat panel surya tidak menghasilkan energi listrik

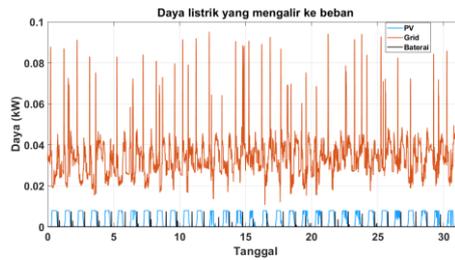
terutama pada malam hari, adanya *curtailed energy* (pemotongan energi) yang besar pada inverter dua arah dan konverter akibat energi listrik yang mengalir dari panel surya serta rugi-rugi energi pada baterai, konverter dan inverter dua arah.



Gambar 6. Biaya pemakaian energi listrik kumulatif



Gambar 7. Daya listrik ke beban untuk kasus I



Gambar 8. Daya listrik ke beban untuk kasus II

Energi listrik total yang disuplai ke beban listrik dari panel surya, grid dan baterai ditunjukkan pada **Tabel 2**. Hasil optimasi untuk energi listrik dari panel surya ditunjukkan pada **Tabel 3**.

Tabel 2. Hasil Optimasi Energi ke Beban

Keterangan	Variabel	Energi Total (kWh)	
		Kasus I	Kasus II
Dari panel surya	$E_{PVtoload}$	7,926	12,728
Dari grid	$E_{gridtoload}$	156,732	151,808
Dari baterai	$E_{disch} * \eta_{batt}$	0,162	0,284

Tabel 3. Hasil Optimasi Energi Dari Panel Surya

Keterangan	Variabel	Energi Total (kWh)	
		Kasus I	Kasus II
Panel surya	$E_{PV}$	13,168	26,338
Panel surya ke beban	$E_{PVtoload}$	7,926	12,728
Panel surya ke baterai	$E_{PVtobatt}$	0,176	0,308
Pemotongan energi panel surya	$E_{PVtocurt}$	4,485	12,358
Panel surya ke grid	$E_{PVtograd}$	0	0
Rugi-rugi pada konverter	$E_{convloss}$	0,170	0,274
Rugi-rugi pada inverter dua arah	$E_{invloss-PV}$	0,423	0,670

Dari **Tabel 3** dapat dilihat bahwa energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya tidak seluruhnya dapat disuplai ke beban, hal ini disebabkan oleh adanya pemotongan energi dari panel surya dan rugi-rugi pada konverter dan inverter dua arah sesuai dengan (6). Jumlah pemotongan energi total dari panel surya untuk kedua kasus masing-masing adalah 4,485 kWh dan 12,358 kWh.

Energi listrik dari grid seluruhnya disuplai ke beban, tidak ada energi listrik yang disuplai ke baterai sehingga tidak terdapat rugi-rugi akibat aliran energi listrik dari grid pada inverter dua arah. Hal ini sesuai dengan (5) dan nilai optimalnya ditunjukkan pada **Tabel 4**.

**Tabel 4.** Hasil Optimasi Energi Dari Grid

Keterangan	Variabel	Energi Total (kWh)	
		Kasus I	Kasus II
Grid ke beban	$E_{gridtoload}$	156,732	151,808
Grid ke baterai	$E_{gridtobatt}$	0	0
Rugi-rugi pada inverter dua arah	$E_{invloss-grid}$	0	0

Energi listrik yang disuplai oleh baterai diperoleh saat *discharging* baterai dan besarnya relatif kecil dan nilai optimalnya ditunjukkan pada **Tabel 5**.

**Tabel 5.** Hasil Optimasi Energi Dari Baterai

Keterangan	Variabel	Energi Total (kWh)	
		Kasus I	Kasus II
<i>Discharging</i>	$E_{disch}$	0,165	0,290
Dari baterai ke beban	$E_{disch} * \eta_{batt}$	0,162	0,284
Rugi-rugi pada inverter dua arah	$E_{invloss-batt}$	0,008	0,014

Rugi-rugi energi pada setiap komponen dari hasil optimasi ditunjukkan pada **Tabel 6**. Rugi-rugi energi total yang dihasilkan semua komponen adalah sebesar 0.621 kWh untuk kasus I dan 0,973 kWh untuk kasus II.

**Tabel 6.** Rugi-rugi Energi Pada Komponen Sistem

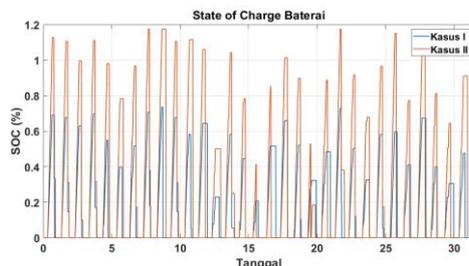
Keterangan	Variabel	Energi Total (kWh)	
		Kasus I	Kasus II
Konverter	$E_{convloss}$	0,172	0,268
Baterai	$E_{battloss}$	0,018	0,021
Inverter dua arah	$E_{pinvloss}$	0,431	0,684

Rugi-rugi pada inverter dua arah merupakan penjumlahan rugi-rugi energi akibat aliran energi listrik dari panel surya, rugi-rugi energi akibat aliran energi listrik dari baterai dan rugi-rugi energi akibat aliran energi listrik dari grid sesuai dengan (11) dan hasil optimasinya ditunjukkan pada **Tabel 7**.

**Tabel 7.** Rugi-rugi Energi Pada Inverter Dua Arah

Keterangan	Variabel	Energi Total (kWh)	
		Kasus I	Kasus II
Akibat aliran energi listrik dari panel surya	$E_{invloss-pv}$	0,423	0,670
Akibat aliran energi listrik dari baterai	$E_{invloss-batt}$	0,008	0,0146
Akibat aliran energi listrik dari grid	$E_{invloss-grid}$	0	0

Nilai persentase SOC baterai selama proses optimasi ditunjukkan pada **Gambar 9**. Terlihat bahwa nilai SOC sangat kecil dan baterai hanya mensuplai sedikit energi listrik ke beban. Hal ini disebabkan oleh pemakaian energi listrik yang hampir selalu lebih besar dari daya keluaran panel surya, dan walaupun kapasitas baterai cukup besar untuk mensuplai beban listrik saat panel surya tidak menghasilkan daya, namun pada saat baterai membutuhkan proses *charging* tentu saja membutuhkan energi dari grid. Hal ini mengakibatkan konsumsi energi listrik dari grid semakin besar dan meningkatkan biaya pemakaian energi listrik dari grid.



**Gambar 9.** SOC baterai

Dari hasil optimasi secara keseluruhan dapat dilihat bahwa jumlah pemotongan energi dari panel surya memegang peranan penting dalam meminimalkan biaya pemakaian energi listrik rumah. Jumlah pemotongan energi dari panel surya dapat dikurangi bila perbandingan kapasitas inverter dua arah (kapasitas ac) terhadap kapasitas panel surya (kapasitas dc) diperbesar. Pada kasus I perbandingan kapasitas ac terhadap kapasitas dc adalah 2 dan menghasilkan pemotongan energi sebesar 4,485 kWh atau 34,06% dari energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya. Sementara pada kasus II perbandingan kapasitas ac terhadap kapasitas dc adalah 1,667 dan menghasilkan pemotongan energi sebesar 12,358 atau 46,92% dari energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya. Sehingga rating inverter yang digunakan mestinya harus lebih besar

Dengan memperhatikan karakteristik nilai pemakaian energi listrik (beban) dari rumah, penambahan kapasitas panel surya dan pemilihan kapasitas baterai yang optimal pada sistem PV-BES perlu dilakukan untuk lebih mengurangi biaya pemakaian listrik dari rumah [26-27]. Penambahan kapasitas panel surya yang melebihi kapasitas beban akan meningkatkan konsumsi sendiri (*self-consumption*) energi listrik dari panel surya dalam menyuplai energi ke beban dan baterai [28], sehingga penggunaan energi listrik dari grid semakin berkurang dan tentu saja mengurangi biaya pemakaian energi listrik.

#### 4. KESIMPULAN

Optimasi sistem panel surya dan baterai (PV-BES) terhubung ke grid dengan memaksimalkan konsumsi energi listrik panel surya dapat meminimasi biaya pemakaian energi listrik rumah. Hasil pengujian menunjukkan bahwa terdapat pengurangan biaya pemakaian energi listrik dari Rp. 222.824 bila tanpa menggunakan sistem PV-BES menjadi Rp. 211.902 atau sebesar Rp. 10.922 untuk kasus I, dan menjadi Rp. 205.243 atau sebesar Rp.17.581 untuk kasus II. Pemilihan kapasitas panel surya yang lebih besar dari beban dapat lebih memaksimalkan konsumsi energi listrik dari panel surya dan mengurangi ketergantungan energi listrik dari grid. Jumlah pemotongan energi panel surya juga menjadi salah satu faktor yang harus diperhatikan untuk lebih meminimalkan biaya pemakaian energi listrik dengan memilih perbandingan kapasitas inverter terhadap kapasitas panel surya yang lebih besar.

#### 5. REFERENSI

- [1] R. Kherzi, A. Mahmoudi, and H. Aki, "Optimal planning of solar photovoltaic and battery storage systems for grid-connected residential sectors: Review, challenges and new perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 153, no. 111763, pp. 1-17, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2021.111763.
- [2] M. Kharseh and H. Wallbaum, "How Adding a Battery to Grid-Connected Photovoltaic System Can Increase its Economic Performance: A Comparison of Different Scenarios," *Energies*, vol. 12, no. 30, pp. 1-19, 2019, doi:10.3390/en12010030.
- [3] R. Martins, H. C. Hesse, J. Jungbauer, T. Vorbuchner, and P. Musilek, "Optimal Component Sizing for Peak Shaving in Battery Energy Storage Systems for Industrial Applications," *Energies*, vol. 11, no. 2048, pp. 1-22, 2018, <https://doi.org/10.3390/en11082048>.

- [4] R. Manojkumar, C. Kumar, S. Ganguly, and J.P.S. Catalao, "Optimal peak shaving control using dynamic demand and feed-in-limits for grid-connected PV sources with batteries," *IEEE System Journal*, vol.15, no.4, pp.5560-5570, 2021, doi: 10.1109/JSYST.2020.3045020.
- [5] S. Englberger, A. Jossen, and H. Hesse, "Unlocking the Potential of Battery Storage with Dynamic Stacking of Multiple Applications," *Cell Reports Physical Science*, vol. 1, no. 100238, pp. 1-15, 2020, doi: 10.1016/j.xcrp.2020.100238.
- [6] J. Engles, B. Claessens, and J. Deconick, "Optimal Combination of Frequency Control and Peak Shaving with Battery Storage Systems," *IEEE Transaction on Microgrid*, vol.11, no.4, pp.3270-3279, 2020, doi: 10.1109/TSG.2019.2963098.
- [7] Y. Jiang, L. Kang, and Y. Liu, "The coordinated optimal design of a PV-battery system with multiple types of PV arrays and batteries: A case study of power smoothing," *Journal of Cleaner Production*, vol. 310, no. 127436, pp. 1-12, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127436.
- [8] J. Solano, M. C. Brito, and E. Caamano-Martin, "Impact of fixed charges on the viability of self-consumption photovoltaics," *Energy Policy*, vol. 122, pp.322-331, 2018, doi: 10.1016/j.enpol.2018.07.059.
- [9] P. E. Campana, L. Cioccolanti, B. Francois, J. Jurasz, Y. Zhang, M. Varini, B. Stridh, and J. Yan, "Li-ion Batteries for Peak Shaving, Price Arbitrage, and Photovoltaic self-consumption in commercial buildings: A Monte Carlo analysis," *Energy Conversion and Management*, vol. 234, no. 113889, pp.1-19, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.113889.
- [10] M. Panwar, S. Chanda, M. Mohanpurkar, Y. Luo, F. Dias, R. Hovsapien, and A. K. Srivastava, "Integration of flow battery for resilience enhancement of advanced distribution grids," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 109, pp.314-324, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.01.024.
- [11] A. Lagrange, M. de Simon-Martin, A. G. Martinez, S. Bracco, and E. Rosales-Asensio, "Sustainable microgrids with energy storage as a means to increase power resilience in critical facilities: an application to a hospital," *Electrical Power and Energy Systems*, vol.119, no.105865, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.105865.
- [12] U. G. K. Mulleriyawage and W. X. Shen, "Impact of demand side management on optimal sizing of residential battery energy storage system," *Renewable Energy*, vol.172, pp.1250-1266, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.03.122.
- [13] M. Rezaeimozafar, R. F. D. Monaghan, E. Barret, and M. Duffy, "A review of behind-the-meter energy storage systems in smart grids," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.164, no.112573, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112573.
- [14] F. Cucchiella, I. D'Adamo, and M. Gastaldi, "The Economic Feasibility of Residential Energy Storage Combined with PV Panels: The Role of Subsidies in Italy," *Energies*, vol. 10, no. 1434, pp. 1-18, 2017, doi: 10.3390/en10091434.
- [15] E. Tervo, K. Agbim, F. DeAngelis, J. Hernandez, H. K. Kim, and A. Odukomaiya, "An economic analysis of residential photovoltaic systems with lithium ion battery storage in the United States," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 94, pp. 1057-1066, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.06.055.
- [16] Y. Wang, R. Das, G. Putrus, and R. Kotter, "Economic evaluation of photovoltaic and energy storage technologies for future domestic energy systems – A case study of UK," *Energy*, vol. 203, pp. 117826, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117826.
- [17] E. G. Lara and F. S. Garcia, "Review on viability and implementation of residential PV-battery systems: Considering the case of Dominican Republic," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 8868-8899, 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.11.208.
- [18] W. Kong, F. Luo, Y. Jia, Z. Y. Dong, and J. Liu, "Benefits of Home Energy Storage Utilization: An Australian Case Study of Demand Charge Practices in Residential Sectors," *IEEE Transaction on Smart Grid*, vol. 12, no. 4, pp. 3086-3096, 2021, doi: 10.1109/TSG.2021.3054126.
- [19] U. G. K. Mulleriyawage and W. X. Shen, "Optimally sizing of battery energy storage capacity by operational optimization of residential PV-Battery system: an Australian household case study," *Renewable Energy*, vol. 160, pp. 852-864, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.07.022.
- [20] A. Pena-Bello, E. Barbour, M. C. Gonzalez, S. Yilmaz, M. K. Patel, and D. Parra, "How Does the Electricity Demand Profile Impact the Attractiveness of PV-Coupled Battery Systems Combining Applications?" *Energies*, vol. 13, no. 4038, pp.1-19, 2020, doi: 10.3390/en13154038.
- [21] A. Pena-Bello, E. Barbour, M. C. Gonzalez, M. K. Patel, and D. Parra, "Optimized PV-coupled battery systems for combining applications: Impact of battery technology and geography," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 112, pp. 978-990, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.06.003.
- [22] J. Liu, Z. Liu, Y. Wu, X. Chen, H. Xiao, and L. Zhang, "Impact of climate on photovoltaic battery energy storage system," *Renewable Energy*, vol. 191, pp. 625-638, 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.04.082.
- [23] C. Galatsopoulos, S. Papadopoulou, C. Ziogou, D. Trigkas, and S. Voutetakis, "Optimal operation of a Residential Battery Energy Storage System in a Time-of-use Pricing Environment," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 5997, pp. 1-22, 2020, doi: 10.3390/app10175997.
- [24] I. Javeed, R. Kherzi, A. Mahmoudi, A. Yazdani, and G. M. Shafiullah, "Optimal Sizing of Rooftop PV and Battery Storage for Grid-Connected House Considering Flat and Time-of-Use Electricity Rates," *Energies*, vol. 14, no. 3520, pp. 1-19, 2021, doi: 10.3390/en14123520.

- [25] E. Banguero, A. Correcher, A. Perez-Navarro, F. Morant, and A. Aristizabal, "A Review on Battery Charging and Discharging Control Strategies: Application to Renewable Energy Systems," *Energies*, vol.11, pp. 1-15, 2018, doi: 10.3390/en11041021.
- [26] J. Koskela, A. Rautiainen, and P. Jarventausta, "Using electrical energy storage in residential buildings – Sizing of battery and photovoltaic panels based on electricity cost optimization," *Applied Energy*, vol. 239, pp. 1175-1189, 2019, doi: j.apenergy.2019.02.021.
- [27] V. Sharma, M. H. Haque, and S. M. Aziz, "Energy cost minimization for net zero energy homes through optimal sizing of battery energy system," *Renewable Energy*, vol. 141, pp. 278-286, 2019, doi:10.1016/j.renene.2019.03.144.
- [28] O. Zebua, N. Wijayawardhana dan Z. Huda, "Analisis Kelayakan Ekonomi dan *Self-Consumption* dari PLTS On-Grid dan Hibrid Kapasitas 1328 kWp," *Electrician – Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, vol. 18, no.1, Januari 2024.

## BIOGRAPHY OF AUTHORS



**Osea Zebua** memperoleh gelar Sarjana Teknik dari Universitas Sumatera Utara tahun 1995 dan Magister Teknik dari Universitas Gadjah Mada tahun 2001. Sekarang bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung. Bidang penelitian yang ditekuni adalah optimasi sistem tenaga listrik, operasi dan perencanaan serta stabilitas sistem tenaga listrik.



**I Made Ginarsa** memperoleh gelar Sarjana Teknik dari Universitas Udayana tahun 1997, Magister Teknik dari Universitas Gadjah Mada tahun 2001 dan Doktor dari Institut Sepuluh Nopember tahun 2012. Sekarang bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Mataram. Bidang penelitian yang ditekuni adalah optimasi sistem tenaga listrik, operasi dan perencanaan serta stabilitas sistem tenaga listrik.