

Optimasi Kapasitas Baterai Pada Perancangan PLTS *Off-Grid* di Indonesia

Naftalin Winanti^{1*}, Een Taryana², Handoko Rusiana Iskandar³, Fauzia Haz⁴, Giri Angga Setia⁵,
Dede Furqon Nurjaman⁶, Harry Butarbutar⁷

^{1,2,3,4,5,6,7}Program Studi Teknik Elektro, Universitas Jenderal Ahmad Yani, Cimahi, Indonesia
naftalin.winanti@lecture.unjani.ac.id^{1*}, eentaryana@lecture.unjani.ac.id²,
handoko.rusiana@lecture.unjani.ac.id³, Fauzia.haz@lecture.unjani.ac.id⁴,
giri.anggaseta@lecture.unjani.ac.id⁵, Dede.furqon@lecture.unjani.ac.id⁶,
harrybutarbutar123@gmail.com⁷

Article Info

Article history:

Diterima: 10 November 2025

Direvisi: 31 January 2026

Disetujui: 20 February 2026

Diterbitkan: Maret 2026

Keywords:

PLTS;

Off-grid;

Hari otonomi;

Optimasi;

Kapasitas Baterai.

ABSTRACT

Potensi sumber energi matahari yang melimpah di Indonesia telah mendorong pertumbuhan pemanfaatan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Umumnya, sistem PLTS yang diterapkan masih menggunakan konfigurasi *on-grid* yang terhubung dengan jaringan PLN. Namun, pada wilayah tertentu yang memiliki keterbatasan akses atau keandalan jaringan listrik, penggunaan sistem PLTS *off-grid* menjadi solusi yang penting untuk menjamin kontinuitas suplai energi. Permasalahan utama dalam desain PLTS *off-grid* adalah tingginya biaya investasi, terutama akibat penggunaan asumsi hari otonomi tetap selama tiga hari tanpa matahari, yang menyebabkan kapasitas baterai dan daya PLTS terpasang menjadi berlebihan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini melakukan simulasi optimasi menggunakan metode *brute force search* guna memperoleh konfigurasi daya terpasang modul surya dan kapasitas baterai yang paling optimal dengan tetap memenuhi kondisi *zero blackout*. Metode ini bekerja dengan mengevaluasi seluruh kombinasi parameter sistem berdasarkan profil beban dan kondisi radiasi matahari, sehingga menghasilkan desain yang adaptif terhadap kondisi nyata lokasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi optimal mampu menurunkan biaya investasi sistem secara signifikan, dengan penghematan berkisar antara 40–60% dibandingkan desain konvensional yang menggunakan asumsi tiga hari otonomi. Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan optimasi berbasis *brute force search* efektif dalam meningkatkan efisiensi teknis dan ekonomi sistem PLTS *off-grid*.

Corresponding Author:

Naftalin Winanti,

Universitas Jenderal Achmad Yani

naftalin.winanti@lecture.unjani.ac.id

1. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki potensi sumber daya matahari yang melimpah. Menurut laporan dari kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, terdapat 4.8 kWh per meter persegi atau setara

dengan 112,000 GWp energi matahari yang tersedia dimana hanya sekitar 10 MWp yang baru terpakai [1]. Saat ini pembangkit listrik tenaga surya tidak hanya digunakan sebagai sumber energi pembangkit listrik di daerah 3T (terpencil, terdalam terluar) Indonesia, tetapi mulai marak dimanfaatkan oleh masyarakat sebagai sumber energi listrik cadangan maupun untuk menghemat pembayaran listrik dari jaringan PLN [2]. Ketertarikan masyarakat ini sangat mendukung untuk memaksimalkan pemanfaatan sumber energi baru terbarukan, khususnya sumber energi matahari yang melimpah di Indonesia.

Dalam perancangan sistem PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya), terdapat dua konfigurasi utama: *on-grid* (terhubung jaringan PLN) dan *off-grid* (mandiri). Sistem *on-grid* terhubung dengan jaringan listrik PLN. Sistem ini memungkinkan pengambilan daya dari PLN ketika produksi surya tidak mencukupi, dan mengeksport kelebihan daya ke jaringan PLN melalui mekanisme ekspor-impor. Sebaliknya, sistem *off-grid* beroperasi secara independen dan memerlukan baterai untuk menyimpan energi guna menjamin pasokan daya ketika sinar matahari tidak tersedia.

Di lokasi-lokasi dengan kualitas infrastruktur kelistrikan yang buruk atau yang kerap mengalami pemadaman listrik (*power outage*) yang fluktuatif, keandalan sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) konfigurasi *on-grid* menjadi sangat tidak efektif. Keterbatasan mendasar sistem *on-grid* adalah ketergantungan mutlak pada jaringan PLN sebagai penyangga. Akibatnya, setiap kali jaringan PLN padam, sistem *on-grid* secara otomatis akan ikut *shutdown* sebagai bentuk protokol keselamatan, sehingga justru meninggalkan pengguna dalam kondisi tanpa pasokan listrik sama sekali. Dalam konteks geografis dan operasional seperti ini, sistem *off-grid* atau mandiri muncul sebagai solusi yang jauh lebih unggul dan andal karena dirancang untuk beroperasi secara independen, terisolasi sepenuhnya dari ketidakstabilan suplai PLN.

Lebih lanjut, dalam proses perencanaan dan perancangan sistem *off-grid* yang kompleks, aspek kritis yang harus mendapat perhatian utama adalah perhitungan kapasitas *bank* baterai yang presisi. Faktor penentunya adalah "hari otonomi" (*days of autonomy*), yaitu estimasi berapa hari sistem harus mampu menyuplai energi secara mandiri tanpa pengisian dari matahari, misalnya selama periode cuaca buruk yang berkepanjangan atau hujan berturut-turut [3]. Kegagalan dalam membuat simulasi beban dan perhitungan kapasitas penyimpanan energi yang akurat akan berakibat fatal. Desain yang tidak memadai akan menyebabkan baterai mengalami *deep discharge* yang merusak dan pada akhirnya memicu *black-out* atau mati total pada sistem, yang justru bertolak belakang dengan tujuan awal pemasangan, yaitu menciptakan ketahanan energi.

Selain permasalahan kontinuitas suplai energi, perhitungan kapasitas baterai pada sistem PLTS *off-grid* saat ini umumnya masih bergantung pada asumsi hari otonomi tetap sebesar 2–3 hari tanpa mempertimbangkan variasi radiasi matahari dan jumlah hari tanpa matahari yang spesifik lokasi [4]. Pendekatan konservatif ini menyebabkan kapasitas baterai yang berlebihan dan berdampak pada meningkatnya biaya investasi sistem secara signifikan karena baterai merupakan komponen utama penyimpanan energi dalam sistem *off-grid* dan dapat menyumbang sebagian besar biaya total sistem. Penggunaan data radiasi yang lebih akurat, misalnya dari basis data satelit seperti NASA POWER, memungkinkan perencanaan sistem yang berbasis kondisi meteorologi lokal, termasuk pemodelan hari tanpa matahari, sehingga dapat mengurangi oversizing kapasitas baterai. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan melakukan optimasi kapasitas baterai PLTS *off-grid* berdasarkan analisis hari tanpa matahari menggunakan data radiasi surya dari basis data NASA, dengan studi kasus di Pulau Jawa, Lombok, dan Kalimantan. Hasil akhir akan dibandingkan dengan pendekatan konservatif dengan hari otonomi 3 hari.

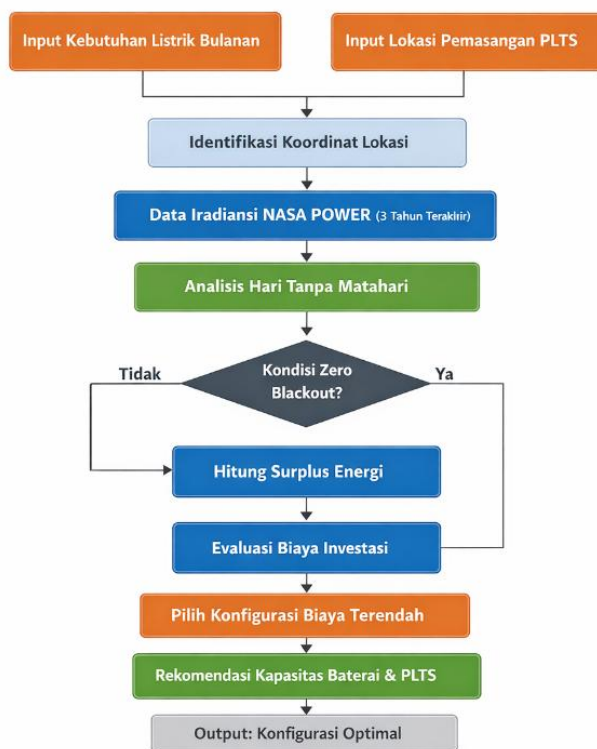
2. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, poin penting dalam parameter perhitungan kapasitas baterai PLTS adalah kontinuitas suplai dan biaya investasi terendah. Kontinuitas suplai dapat didukung oleh kesesuaian kapasitas baterai yang mana bergantung pada penentuan hari otonomi yang sesuai pada lokasi PLTS. Untuk mendapatkan biaya investasi terendah, maka dilakukan proses optimasi

dengan menggunakan metode Optimasi *Brute-Force-Search* [5]. Dalam proses optimasi, perhitungan akan mempertimbangkan letak *geolocation* dari wilayah yang akan dievaluasi, dimana pada penelitian ini diambil sampel Lokasi Kota Bandung, Jakarta, Semarang, Yogyakarta, Mataram dan Pontianak sebagai perwakilan titik lokasi di ketiga pulau. Pemilihan titik lokasi mewakili kondisi geografis yang berbeda diharapkan mewakili kondisi penyinaran matahari di pulau tersebut.

2.1. Parameter Desain

Untuk merancang sebuah sistem pembangkit energi surya *off-grid* yang optimal, langkah kritis yang harus dilakukan adalah dengan membangun sebuah model matematis. Model ini berfungsi untuk mengkuantifikasi atau memberikan nilai numerik terhadap berbagai skenario desain yang mungkin. Tujuannya adalah untuk mengevaluasi dan membandingkan kinerja setiap skenario secara objektif.



Gambar 1. Diagram alir sistem.

Kuantifikasi tersebut pada akhirnya difokuskan untuk mencapai tujuan utama, yaitu mendesain sistem yang mampu meminimalkan risiko pemadaman listrik (*black-out*) hingga mendekati nol. Dengan kata lain, sistem dirancang agar pasokan listrik dari panel surya dan baterai dapat memenuhi permintaan beban setiap hari, tanpa terjadi kekurangan daya dengan kapasitas baterai yang sesuai dengan kebutuhan dan biaya investasi yang rendah.

Untuk memastikan keakuratan dan keandalan desain, model ini akan dijalankan dengan menggunakan data harian radiasi matahari dari NASA yang mencakup periode tiga tahun terakhir. Penggunaan data historis dalam jangka waktu yang cukup panjang ini bertujuan untuk menangkap variabilitas cuaca dan musim, sehingga sistem yang dihasilkan tidak hanya optimal pada kondisi ideal, tetapi juga tangguh dalam menghadapi fluktuasi radiasi matahari di dunia nyata.

Setelah *database* 3 tahun waktu puncak matahari didapatkan, dan pengguna memasukkan kebutuhan Listrik harian bulanan, simulasi mulai menghitung kapasitas baterai dimulai dari

kapasitas baterai 0.1 kWh yang divariasikan pada daya solar panel terpasang mulai dari 100 Wp. Sistem kalkulasi memanfaatkan surplus energi yang terjadi sebagai parameter hitung. Ketika surplus energi bernilai negatif, maka syarat *zero black-out* tidak terpenuhi dan pasangan konfigurasi kapasitas baterai dan daya solar panel divariasikan kembali. Dari hasil optimalisasi diatas, kemudian dibandingkan kalkulasi antara nilai optimal kapasitas baterai dan daya solar panel yang terpilih dengan hari otonomi yang dipatok pada angka tiga hari untuk beberapa lokasi di Indonesia.

Alur logika kalkulasi optimalisasi pada model adalah dengan mendapatkan *input* kebutuhan listrik bulanan dari pengguna, serta lokasi pemasangan PLTS. Setelah mendapatkan titik lokasi, model akan mengambil data dari *database* NASA POWER. Data yang diambil berupa kondisi iradiansi lokasi per jam selama 3 tahun terakhir. Model akan dan melakukan kalkulasi untuk memenuhi kondisi zero blackout dengan menghitung total hari tanpa matahari dari *database* NASA POWER dan surplus energi yang terjadi dengan mempertimbangkan biaya investasi terendah seperti yang dijelaskan pada Gambar 1.

2.1.1 Zero Black-out

Definisi *Zero Black-Out* pada sistem adalah kondisi dimana pembangkit dapat mensuplai kebutuhan listrik pengguna secara berkelanjutan meskipun tanpa penyinaran matahari [6]. Untuk itu, maka perlu dicari pasangan kapasitas solar panel dan baterai dengan surplus energi total selama 3 tahun bernilai positif. Jika dalam proses iterasi terdapat surplus energi yang negatif, maka akan dilakukan iterasi pada design kapasitas solar panel dan baterai lainnya. Skenario tersebut akan dijabarkan melalui persamaan (1) dimana BC adalah kapasitas baterai (kWh), P adalah daya terpasang (Wp) dan $SE_{date, P, BC}$ adalah Surplus energi (kWh) :

$$\left(\sum_{BC=0.1}^{100} \sum_{P=100}^{15000} \left(\sum_{date=1 \text{ Jan } 2021}^{31 \text{ Dec } 2024} (SE_{date, P, BC} > 0) \right) \right) \quad (1)$$

Ketika persamaan (1) terpenuhi, maka nilai kapasitas baterai dan daya solar panel terpasang akan disimpan menjadi desain dengan biaya minimal untuk mencapai *zero black-out* yang teruji selama 3 tahun klimatologis data NASA .

2.1.2 Surplus Energi

Berdasarkan persamaan (1), surplus energi dapat ditentukan dari konsumsi energi harian dan energi yang dihasilkan [7]. Surplus energi akan dibagi kedalam 2 bagian, yakni surplus dari konsumsi siang hari, dan surplus dari konsumsi energi di malam hari.

Pada siang hari, energi yang dihasilkan akan dikonsumsi oleh beban selama waktu puncak matahari. Selain itu, surplus energi berlebih pada hari sebelumnya akan menjadi faktor penambah energi pada surplus energi pada hari ini. Hal ini dijabarkan pada persamaan (2) dengan T_{date} adalah waktu puncak matahari (jam), P adalah daya terpasang (Wp), SE_{date} adalah surplus energi (kWh) dan SE_{date-1} adalah surplus energi harian kemarin (kWh) :

$$SE_{date} = \frac{P}{1000} \times T_{date} + SE_{date-1} - C \times T_{date} \quad (2)$$

Energi yang berlebih, akan disimpan pada baterai dimana baterai memiliki kapasitas maksimal tertentu. Oleh karena itu surplus energi pada siang hari akan dibatasi oleh kapasitas baterai yang akan dijabarkan pada persamaan (3)

$$SE_{date} = \max(0, \min(SE_{date}, BC)) \quad (3)$$

Energi yang tersimpan pada baterai, kemudian akan digunakan untuk konsumsi energi pada malam hari. Hal ini mengkoreksi Surplus Energi yang bisa digunakan pada konsumsi energi keesokan harinya. Hal ini akan dijabarkan oleh persamaan (4)

$$SE_{date} = SE_{date-1} - C \times (24 - T_{date}) \quad (4)$$

2.1.3 Perhitungan Biaya

Untuk perbandingan biaya, dalam jurnal ini, diasumsikan biaya solar panel per Wp adalah Rp 6,000, biaya baterai per kWh adalah US\$135 atau setara Rp 1,900,000 [8]. Untuk infrastruktur lainnya, seperti *inverter*, struktur aluminium, kabel, biaya fabrikasi, dll, akan memenuhi persamaan yang didapatkan berdasarkan data penelitian sebelumnya [9]. Hal ini akan dijabarkan dalam persamaan (5)(6)(7)(8) dengan C_{other} adalah biaya lain-lain (rupiah), C_{panel} adalah biaya solar panel (Rupiah), $C_{battery}$ adalah biaya baterai (rupiah) dan C_{Total} adalah biaya total (rupiah) :

$$Cost_{Other} = 44,157 \times P^{-0.125} \times P \tag{5}$$

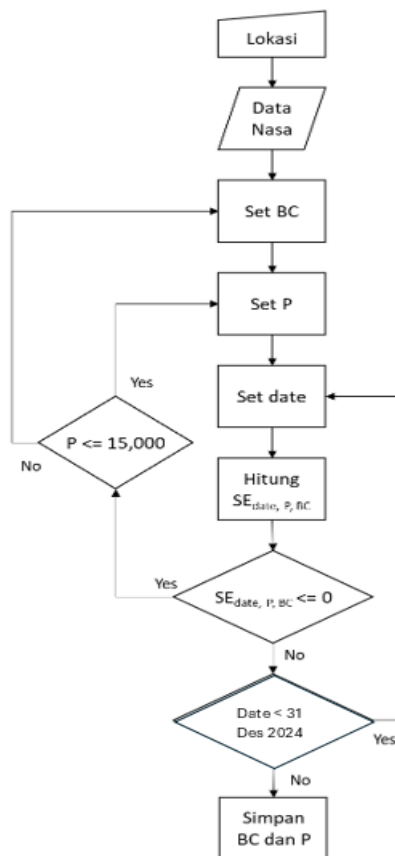
$$Cost_{Panel} = 6,000 \times P \tag{6}$$

$$Cost_{Battery} = 1,900,000 \times BC \tag{7}$$

$$Cost_{Total} = Cost_{Panel} + Cost_{Battery} + Cost_{Other} \tag{8}$$

2.1.4 Metode Optimasi

Untuk mendapatkan nilai minimum, persamaan (1) perlu diiterasi untuk mencapai kondisi yang diinginkan dengan melakukan variasi pada kapasitas baterai dan desain solar energi yang digunakan. Terdapat banyak metode iterasi yang dapat dilakukan. Pada penelitian kali ini metode iterasi yang akan digunakan adalah *brute-force-search* [10], yakni dengan menguji setiap kemungkinan design dari kapasitas baterai = 0.1 kWh dan solar energi terpasang = 100 Wp hingga mencapai definisi *zero black-out* sesuai persamaan (1). Kalkulasi matematis model dijelaskan pada Gambar 2 berikut.



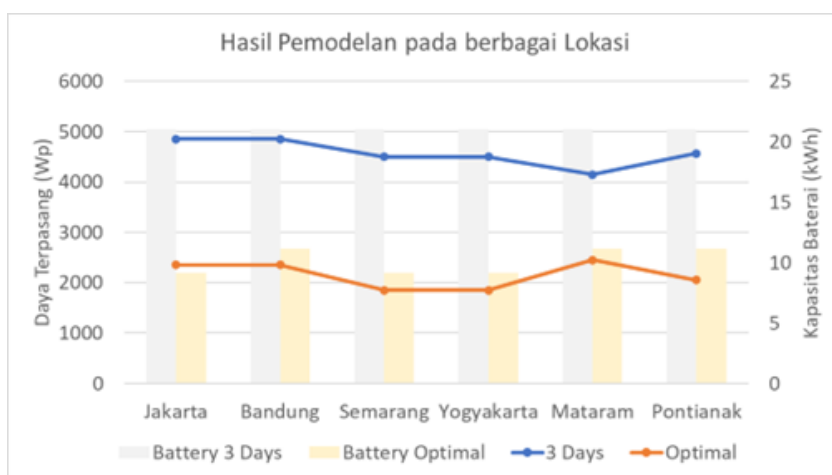
Gambar 2. Diagram alir model optimasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

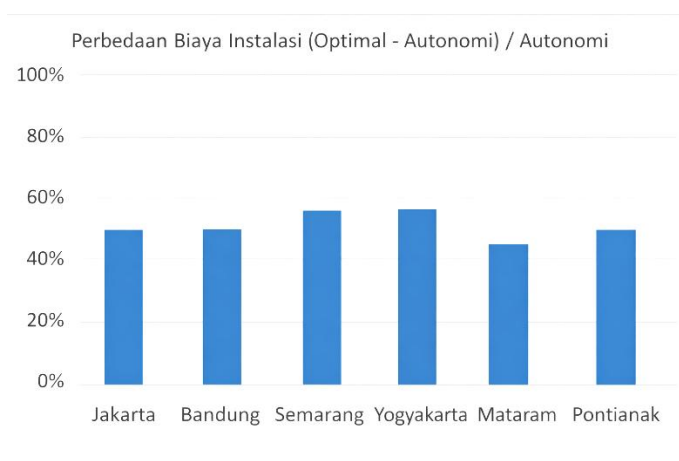
Dari beberapa daerah yang dipilih, penulis memilih 6 kota besar di Indonesia yang akan dievaluasi, yakni Jakarta, Bandung, Semarang, Yogyakarta, Mataram dan Pontianak. Pemilihan

tidak mempertimbangkan faktor apapun kecuali ketersebaran wilayah. Untuk sistem yang memenuhi syarat 3 hari suplai tanpa matahari, desain baterai maka harus memenuhi 3 hari kebutuhan energi harian pelanggan. Jika biaya listrik bulanan rata-rata diasumsikan di-input pelanggan Rp 300,000 maka konsumsi energi hariannya adalah 6.99 kWh dengan menggunakan data tersebut maka kapasitas baterai pada desain hari otonomi 3 hari akan berkisar pada 21 kWh. Kebutuhan energi dan kapasitas baterai tersebut kemudian digunakan pada 6 kota sampel untuk kemudian didapat kapasitas PLTS yang sesuai dengan kondisi masing-masing kota.

Besaran kapasitas PLTS dan baterai pada 6 kota dengan hari otonomi 3 hari kemudian dibandingkan dengan kapasitas baterai dan PLTS yang didapatkan oleh hasil optimasi oleh model yang dibuat. Setelah dilakukan perbandingan nilai data, dapat dilihat pada Gambar 3 untuk skenario konvensional, daya terpasang PLTS berada pada kisaran 4,8–5,0 kWp dengan kapasitas baterai sekitar 20 kWh di seluruh lokasi. Sementara itu, hasil optimasi menunjukkan penurunan daya terpasang menjadi sekitar 4,2–4,7 kWp dan kapasitas baterai menjadi 8–12 kWh, tergantung pada karakteristik lokasi. Penurunan paling signifikan terjadi di Mataram, dengan kapasitas baterai optimal sekitar 12 kWh dibandingkan 20 kWh pada metode konvensional, sedangkan lokasi dengan iradiasi lebih stabil seperti Semarang dan Yogyakarta membutuhkan kapasitas baterai optimal sekitar 8–9 kWh.



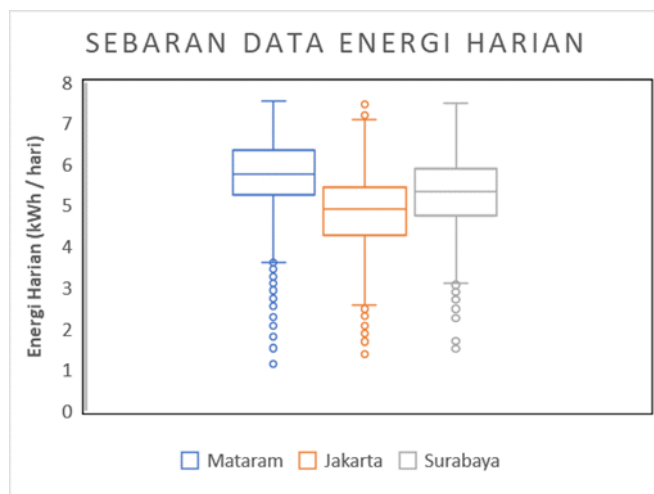
Gambar 3. Hasil pemodelan sistem di 6 lokasi contoh.



Gambar 4. Hasil biaya optimasi di 6 lokasi.

Pada desain optimal, dengan mempertimbangkan data masa lampau harian solar energi dari NASA POWER, maka akan muncul variasi dari proses iterasi. Dalam kasus Jakarta dan Bandung, meskipun jumlah daya terinstalnya serupa, namun kapasitas baterai yang dibutuhkan pada lokasi Bandung perlu lebih tinggi dibandingkan Jakarta. Hal ini dapat dipengaruhi oleh waktu puncak matahari yang lebih rendah di lokasi Bandung. Jika dianalisis lebih lanjut, biaya investasi model optimal memiliki biaya yang lebih rendah dari desain dengan hari otonomi 3 hari, rata-rata design optimal memiliki biaya yang lebih murah antara 40 – 60% dibandingkan desain hari otonomi 3 hari, dijelaskan pada Gambar 4. Biaya penghematan terbesar terjadi pada lokasi Semarang dan Yogyakarta, dan biaya penghematan terendah terjadi di kota Mataram.

Dari hasil analisis biaya, biaya hasil optimasi Mataram adalah yang terendah jika dibandingkan ke 5 kota lainnya. Hal ini dikarenakan kondisi iradiansi dan hari tanpa matahari di Mataram yang berbeda dengan kota-kota lainnya yang dijadikan sampel. Secara rata-rata bulanan, Mataram memiliki waktu puncak Matahari yang lebih tinggi dibandingkan kelima wilayah lainnya. Namun secara harian, terdapat lembah-lembah yang menyebabkan membutuhkan kapasitas baterai pada daerah Mataram lebih tinggi namun daya solar panel terpasangnya lebih rendah. Hal ini ditunjukkan oleh data pada Gambar 5.



Gambar 5. Sebaran data energi harian.

4. KESIMPULAN

Pada studi permodelan optimasi kapasitas baterai PLTS off-grid terhadap 6 kota di Indonesia (Jakarta, Bandung, Semarang, Yogyakarta, Mataram, dan Pontianak) menunjukkan bahwa model optimasi dikatakan sangat mendekati kondisi lapangan karena dirancang dengan menggunakan kondisi pendekatan berbasis data klimatologis historis. Sebagai contoh, untuk konsumsi listrik bulanan Rp 300.000 (setara 6,99 kWh/hari), desain konvensional dengan hari otonomi membutuhkan kapasitas baterai yang sama sebesar 21 kWh untuk keenam wilayah sampel, namun melalui pendekatan optimasi ditemukan variasi kebutuhan yang signifikan antar wilayah. Bandung membutuhkan kapasitas baterai lebih tinggi 15-20% dibandingkan Jakarta meski daya panel suryanya sama, sementara Mataram membutuhkan kapasitas baterai 25% lebih besar dengan daya panel 20% lebih rendah dibandingkan kota lainnya. Dari perhitungan biaya investasi, didapatkan model pada penelitian dapat menghemat biaya investasi sebesar 40-60% dari desain konvensional 3 hari otonomi. Dapat dikatakan bahwa pendekatan berbasis klimatologis historis yang dilakukan pada model optimasi penelitian ini lebih sesuai dan lebih efisien dalam perancangan kapasitas baterai PLTS *off-grid*.

REFERENSI

- [1] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, *Potensi Energi Surya di Indonesia*, Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi (EBTKE), Jakarta, Indonesia. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/news-archives/matahari-untuk-plts-di-indonesia>
- [2] E. Tarigan, "Techno-Economic Analysis of Residential Grid-Connected Rooftop Solar PV Systems in Indonesia Under MEMR 26/2021 Regulation," *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 14, no. 1, pp. 412–417, 2024, doi: 10.32479/ijeep.15277
- [3] S. Amara and C. Ben Salah, "Impact of autonomy days in microgrid sizing," in *Proc. IEEE 21st Int. Conf. on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, Sousse, Tunisia, Dec. 2022, pp. 1–6, doi: 10.1109/STA56120.2022.10019250.
- [4] IEEE Std 1562-2007 (Reaffirmed 2020), "IEEE Guide for Array and Battery Sizing in Stand-Alone Photovoltaic Systems," IEEE Standards Association, New York, USA.
- [5] R. T. Marler and J. S. Arora, "Survey of multi-objective optimization methods for engineering," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 26, no. 6, pp. 369–395, Jun. 2004, doi: 10.1007/s00158-003-0368-6.
- [6] A. Z. Abdul Karim, M. S. Osman, and M. K. Rahmat, "A review on risk and reliability analysis in photovoltaic power generation," *Energies*, vol. 18, no. 14, art. no. 3790, 2025, doi: 10.3390/en18143790.
- [7] L. Cheng, Y. Kim, J. Lee, and H. Kim, "Quantifying PV surplus at an urban scale: A case study in Seoul," *Energy and Buildings*, vol. 298, art. no. 113523, 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113523.
- [8] N. Winanti, T. D. Rachmilda, A. Purwadi, N. Heryana, and H. R. Iskandar, "Potential for dieselization: A case study on Kodingareng Island, Indonesia," in *Proc. 2024 6th Int. Conf. on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE)*, Bandung, Indonesia, 2024, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICPERE63447.2024.10845272.
- [9] N. Winanti, C. A. Mailoa, H. R. Iskandar, G. A. Setia, and N. T. Somantri, "System optimization design of rooftop grid-tied solar power plant for residential customers in Indonesia," in *Proc. 2021 3rd Int. Conf. on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*, Oct. 2021, pp. 222–226, doi:10.1109/ICHVEPS53178.2021.9601036.
- [10] M. Kolhe, S. Kolhe, and J. C. Joshi, "Economic viability of stand-alone solar photovoltaic system using exhaustive search optimization," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 8, pp. 1720–1726, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.renene.2009.11.031.