



Desain Pohon Surya untuk Pemenuhan Kebutuhan Listrik di Desa Bungintende

Bill Johan Soentpiet*, Dhami Johar Damiri

Institut Teknologi PLN, Indonesia

Email: billjohansoentpiet1998@gmail.com*

Keywords:

Bungintende Village, geometric optimization, solar energy, Solar Tree, standalone PV.

Abstract

Bungintende Village is an island community without access to the PLN electricity grid and with limited land availability, requiring a renewable electrification alternative that uses space efficiently. This study aims to design and evaluate a modular Solar Tree as a standalone photovoltaic system for village electrification, optimize its geometry to reduce mutual shading loss, and estimate the required number of units and investment costs. The method includes energy-demand analysis, preliminary sizing, a simplified Fibonacci-based geometric model, 3D modeling, parametric optimization of rotation, bracket radius, and module tilt, near-shading and standalone simulations using PVsyst 8, unit sizing, and conceptual investment estimation. One unit consists of thirty 550 Wp modules with 16.5 kWp installed capacity. The final geometry combines an additional 60° rotation, a 50% radius increase, and 15° tilt, reducing near-shading loss from 20.5% to 15.3%. One unit produces 19,826 kWh/year of Useful Energy with a 62.42% Performance Ratio and 96.98% Solar Fraction. The village demand of 204,400 kWh/year requires 11 units or 181.5 kWp. The conceptual investment is approximately IDR 25.23 billion, dominated by energy storage. It is concluded that the modular Solar Tree has the potential to serve as a space-efficient standalone PV alternative for island communities, though further technical verification is required prior to implementation.

Kata Kunci:

Desa Bungintende, energi surya, optimasi geometri, PLTS standalone, Pohon Surya.

Abstrak

Desa Bungintende merupakan wilayah kepulauan yang belum terjangkau jaringan listrik PLN dan memiliki keterbatasan lahan, sehingga membutuhkan alternatif elektrifikasi berbasis energi terbarukan yang efisien dalam pemanfaatan ruang. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengevaluasi Pohon Surya modular sebagai sistem PLTS standalone untuk elektrifikasi desa, serta mengoptimasi geometri guna menekan mutual shading loss dan mengestimasi kebutuhan unit serta biaya investasi. Metode penelitian meliputi analisis kebutuhan energi, preliminary sizing, penyusunan geometri awal berbasis pola Fibonacci yang disimplifikasi, pemodelan tiga dimensi, optimasi parametrik sudut rotasi, radius bracket, dan tilt, simulasi near shading dan standalone menggunakan PVsyst versi 8, penentuan jumlah unit, serta estimasi biaya investasi konseptual. Satu unit terdiri atas 30 modul 550 Wp dengan kapasitas 16,5 kWp. Konfigurasi akhir menggunakan tambahan rotasi 60°, penambahan radius 50%, dan tilt 15° sehingga near shading loss turun dari 20,5% menjadi 15,3%. Satu unit menghasilkan Useful Energy 19.826 kWh/tahun dengan Performance Ratio 62,42% dan Solar Fraction 96,98%. Kebutuhan desa sebesar 204.400 kWh/tahun memerlukan 11 unit atau 181,5 kWp dengan estimasi investasi konseptual sekitar Rp25,23 miliar yang didominasi oleh sistem penyimpanan energi. Simpulan penelitian ini menunjukkan bahwa Pohon Surya modular berpotensi menjadi alternatif PLTS standalone yang efisien ruang bagi wilayah kepulauan, namun tetap memerlukan verifikasi teknis lebih lanjut sebelum implementasi.

PENDAHULUAN

Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang besar dan sekitar separuh dari potensi tersebut berasal dari energi surya (Hasrul, 2021). Pemanfaatannya masih jauh di bawah potensi yang tersedia (Humas EBTKE, 2020). PLTS memanfaatkan radiasi matahari untuk dikonversi menjadi energi listrik melalui modul fotovoltaik (Gopi et al., 2021) (Asyifah et al., 2024). Pada penerapan di wilayah kepulauan, kebutuhan lahan menjadi salah satu pertimbangan penting karena daratan yang tersedia tidak hanya digunakan untuk pembangkit (Samsurizal et al., 2021), tetapi juga untuk permukiman, fasilitas umum, serta aktivitas sosial-ekonomi masyarakat.

Desa Bungintende terletak di Pulau Bungintende, Kecamatan Bungku Selatan, Kabupaten Morowali, Provinsi Sulawesi Tengah. Wilayah ini belum terjangkau jaringan listrik PLN (Krunal Hindocha & Dr. Sweta Shah, 2020). Berdasarkan data Digital Elevation Model yang digunakan pada penelitian, elevasi pulau berada sekitar 0–5 m di atas permukaan laut. Daratan yang relatif terbatas dan sebagian besar telah dimanfaatkan untuk permukiman menyebabkan konsep PLTS yang efisien dalam pemanfaatan ruang menjadi relevan untuk dipertimbangkan (Sanjaya et al., 2024).



Gambar 1. Citra Satelit Desa Bungintende
Sumber: Google Maps, 2025

Pohon Surya merupakan konfigurasi PLTS vertikal yang menempatkan modul fotovoltaik (Gonçalves de Bem et al., 2022) pada batang dan cabang sehingga bidang penerima radiasi dapat disusun pada beberapa arah dan tingkat. Konsep ini telah dibahas pada berbagai penelitian mengenai konfigurasi, efisiensi pemanfaatan lahan, performa energi, dan aplikasi perkotaan (Ruffing et al., 2016). Namun, studi terdahulu umumnya belum menggabungkan optimasi geometri antarmodul, simulasi standalone dengan penyimpanan energi, penentuan jumlah unit untuk elektrifikasi desa, dan konsekuensi biaya investasi dalam satu studi kasus wilayah kepulauan.

Tabel 1. Ringkasan Penelitian Terkait dan Posisi Penelitian

Ref.	Fokus	Hasil/Relevansi	Gap terhadap penelitian ini
[17]	Review desain Solar PV Tree	Menunjukkan keunggulan pemanfaatan lahan dan ragam konfigurasi Pohon Surya.	Belum mengevaluasi desain standalone spesifik untuk elektrifikasi desa.
[18]	Konfigurasi, operasi, dan komersialisasi Solar Tree	Membahas tipe, teknologi, serta peluang implementasi Solar Tree.	Tidak membahas kebutuhan energi dan BESS pada pulau terpencil.
[19]	Analisis multi-aspek Pohon Surya	Meninjau aspek geometri, filotaksi, performa, dan implementasi.	Belum mengintegrasikan optimasi geometri dengan sizing desa dan biaya investasi.
[20]	Penentuan sudut optimal Solar Tree	Menunjukkan pentingnya orientasi panel terhadap penerimaan radiasi.	Optimasi berfokus pada sudut dan belum pada radius, tilt, penyimpanan, serta skala desa.
[21]	Analisis performa Solar Tree	Mengevaluasi karakteristik performa konfigurasi Pohon Surya.	Belum mengkaji implementasi modular untuk elektrifikasi pulau.

Sumber: Disusun oleh peneliti berdasarkan tinjauan literatur, 2025

Berdasarkan celah tersebut, kebaruan penelitian ini terletak pada penggabungan optimasi geometri Pohon Surya berbasis pola Fibonacci yang disimplifikasi (dengan variasi rotasi, radius bracket, dan tilt) dengan simulasi sistem standalone berskala desa serta estimasi biaya investasi konseptual pada satu studi kasus wilayah kepulauan yang belum terjangkau listrik. Penelitian ini tidak hanya berhenti pada desain geometri, tetapi juga menghubungkan hasil optimasi dengan kinerja (Dierauf et al., 2013) energi tahunan, kebutuhan jumlah unit untuk memenuhi beban desa, dan konsekuensi biaya dari konfigurasi yang dirancang.

Penelitian ini bertujuan untuk: merancang dan mengoptimasi geometri Pohon Surya modular berbasis pola Fibonacci yang disimplifikasi melalui variasi sudut rotasi, radius bracket, dan kemiringan modul guna menekan mutual shading loss; mengevaluasi kinerja energi satu unit Pohon Surya (Kaur & Singh, 2021) dalam sistem standalone melalui simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst; menentukan jumlah unit yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan listrik Desa Bungintende; serta mengestimasi biaya investasi konseptual dari konfigurasi sistem yang dirancang (Jamal et al., 2024).

Hasil penelitian ini diharapkan memberikan manfaat teoretis dan praktis. Secara teoretis, penelitian ini memperkaya literatur mengenai desain dan optimasi Pohon Surya (Rajaei & Jalali, 2022) dengan menghubungkan aspek geometri, kinerja energi, dan biaya investasi dalam satu kerangka studi kasus wilayah kepulauan, yang selama ini masih jarang dibahas secara terpadu. Secara praktis, penelitian ini memberikan alternatif solusi elektrifikasi bagi desa-desa terpencil dan kepulauan yang memiliki keterbatasan lahan, dengan menyajikan rancangan sistem yang modular dan dapat direplikasi sesuai kebutuhan. Bagi masyarakat dan pemerintah daerah, hasil penelitian ini dapat menjadi bahan pertimbangan dalam perencanaan elektrifikasi berbasis energi terbarukan yang efisien ruang dan berkelanjutan. Bagi peneliti selanjutnya, penelitian ini menyediakan kerangka awal yang dapat dikembangkan lebih lanjut melalui analisis struktur, optimasi multivaribel, dan pengujian lapangan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif kuantitatif dengan pendekatan studi kasus. Penelitian deskriptif bertujuan untuk menggambarkan secara sistematis dan faktual mengenai karakteristik suatu fenomena atau objek penelitian, dalam hal ini desain dan evaluasi kinerja Pohon Surya sebagai sistem PLTS standalone untuk elektrifikasi Desa Bungintende. Pendekatan studi kasus dipilih karena penelitian berfokus pada satu lokasi spesifik (Desa Bungintende) dengan karakteristik unik berupa wilayah kepulauan yang belum terjangkau jaringan listrik PLN dan memiliki keterbatasan lahan. Pendekatan kuantitatif digunakan karena data yang dikumpulkan berupa angka-angka (kebutuhan energi, kapasitas sistem, radiasi matahari, biaya investasi) dan dianalisis secara statistik serta melalui simulasi numerik menggunakan perangkat lunak PVsyst.

Lokasi, Kebutuhan Energi, dan Profil Beban

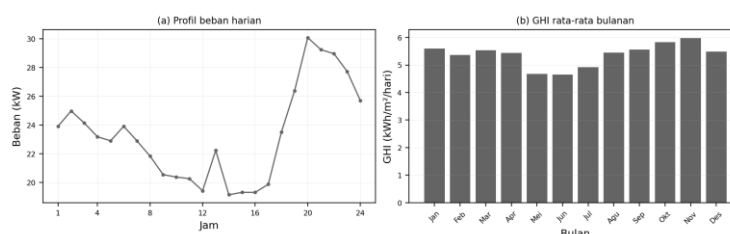
Penelitian merupakan penelitian deskriptif kuantitatif dengan pendekatan studi kasus. Data utama berupa jumlah calon pelanggan, skenario penggunaan peralatan rumah tangga, profil beban rujukan, data GHI Meteonorm, spesifikasi modul dan baterai (Lee, 2019), geometri model, serta harga komponen dan pekerjaan (Franklin & Ed., 2018). Satu rumah diasumsikan membutuhkan energi sekitar 4 kWh/hari. Dengan 140 calon pelanggan, kebutuhan energi Desa Bungintende menjadi 560 kWh/hari atau 204.400 kWh/tahun.

Tabel 2. Skenario Konsumsi Energi Harian per Rumah

Peralatan	Jumlah	Daya (W)	Jam nyala	Energi (Wh)
Lampu LED	10	10	12	1.200
TV LED	1	90	4	360
Kulkas	1	90	24	2.160
Peralatan lain	1	70	4	280
Total per rumah				4.000
Total 140 pelanggan				560.000

Sumber: Skenario kebutuhan energi Desa Bungintende, 2025

Profil kebutuhan daya selama 24 jam dibentuk menggunakan load factor rujukan PLTS Tomia yang digunakan pada penelitian. Hasil koreksi menunjukkan beban terendah pada siang hingga sore hari sekitar 19–20 kW, sedangkan beban puncak sebesar 30,07 kW terjadi pada sekitar pukul 20.00. Pola tersebut digunakan sebagai dasar penyusunan User Needs pada PVsyst. Pada preliminary design, kebutuhan desa dibagi ke dalam sepuluh unit acuan sehingga kebutuhan satu unit untuk simulasi ditetapkan sekitar 56 kWh/hari.



Gambar 2. Data masukan energi: (a) profil beban harian Desa Bungintende, (b) GHI rata-rata bulanan Meteonorm

Sumber: (a) Profil beban acuan PLTS Tomia yang dimodifikasi untuk Desa Bungintende, 2025; (b) Meteonorm 8.1, 2025

Sumber Daya Surya dan Preliminary Sizing

Data potensi energi surya pada simulasi diperoleh dari Meteonorm. Nilai GHI rata-rata bulanan berada pada rentang 4,650–5,980 kWh/m²/hari. Nilai terendah terjadi pada bulan Juni sebesar 4,650 kWh/m²/hari dan digunakan sebagai dasar conservative sizing. Performance (Gangwar et al., 2025) ratio awal dihitung dari asumsi rugi temperatur, kabel, inverter, soiling, mismatch, dan shading. Jumlah asumsi rugi sebesar 22% menghasilkan PR awal 0,78.

Tabel 3. Parameter Kehilangan untuk Perhitungan Performance Ratio Awal

Parameter	Asumsi	Dasar penggunaan
Temperatur	5%	Rugi temperatur modul c-Si pada kondisi operasi.
Wiring	2%	Rugi resistif kabel dan sambungan.
Inverter	3%	Rugi konversi inverter.
Soiling	2%	Debu dan kotoran pada permukaan modul.
Mismatch	2%	Ketidaksesuaian karakteristik antarmodul.
Shading	10%	Asumsi awal untuk mengantisipasi bayangan parsial.
PR awal	0,78	Hasil setelah memperhitungkan rugi-rugi awal.

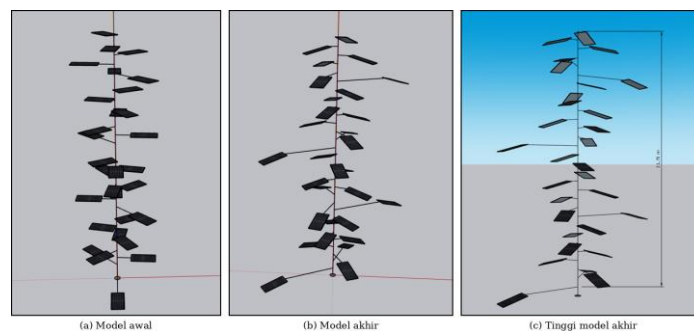
Sumber: Asumsi penelitian berdasarkan literatur dan preliminary design, 2025

$$P_{\text{installed}} = E_{\text{daily}} / (H_{\text{daily}} \times PR_{\text{total}})$$

Dengan kebutuhan energi 560 kWh/hari, H_{daily} 4,650 jam/hari, dan PR 0,78, kapasitas awal sistem diperoleh sebesar 154,40 kWp. Nilai ini merupakan acuan kapasitas pada skala desa dan belum langsung menjadi kapasitas akhir implementasi. Penelitian selanjutnya menggunakan pendekatan modular, yaitu satu Pohon Surya berkapasitas 16,5 kWp yang terdiri atas 30 modul 550 Wp. Kapasitas akhir desa ditentukan kembali dari Useful Energy tahunan satu unit hasil simulasi.\

Desain Model Awal dan Optimasi Geometri

Model awal disusun pada struktur vertikal menggunakan prinsip Fibonacci yang disimplifikasi. Offset sudut dasar antarposisi panel sebesar 137,5°. Pola radial dibatasi sampai delapan posisi bracket dan kemudian diulang untuk menempatkan seluruh 30 modul. Jarak vertikal antartingkat dipertahankan 0,75 m sehingga rentang vertikal dari modul paling bawah sampai paling atas sebesar 21,75 m (Praswanto et al., 2023). Jumlah modul, daya modul, dan spacing vertikal dipertahankan selama optimasi agar perubahan shading loss dapat ditelusuri terhadap variabel geometri yang diuji.



Gambar 3. Perkembangan model Pohon Surya: (a) model awal, (b) model akhir hasil optimasi, (c) tinggi model akhir 21,75 m

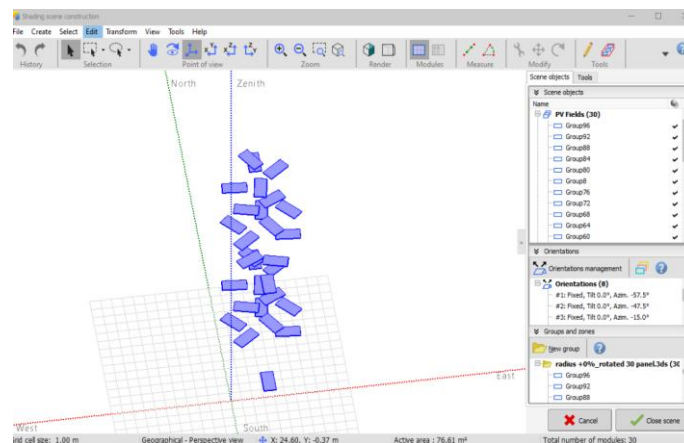
Sumber: Hasil pemodelan dan optimasi geometri, 2025

Tabel 4. Panjang Bracket Model Awal dan Model Akhir

Kelompok panel	Model awal (m)	Model akhir (m)	Perubahan
1, 9, 17, 25	3,4	5,1	+50%
2, 10, 18, 26	2,1	3,2	$\approx +50\%$
3, 11, 19, 27	1,3	2,0	$\approx +50\%$
4, 12, 20, 28	0,8	1,2	+50%
5, 13, 21, 29	0,5	0,8	$\approx +50\%$
6, 14, 22, 30	0,3	0,5	$\approx +50\%$
7, 15, 23	0,2	0,3	+50%
8, 16, 24	0,1	0,2	Pembulatan geometri

Sumber: Hasil pemodelan dan optimasi geometri, 2025

Optimasi dilakukan secara parametrik terhadap tiga variabel. Pertama, sudut rotasi tambahan diuji pada rentang 0–180° dengan interval 15°. Kedua, radius/panjang bracket dinaikkan 0–50% dengan interval 10%. Ketiga, tilt diuji pada 0°, 5°, 10°, dan 15°. Setiap kelompok pengujian dilakukan terhadap konfigurasi dasar dengan parameter lain dipertahankan tetap. Nilai terbaik dari masing-masing pengujian kemudian digabungkan menjadi model akhir. Analisis near shading difokuskan pada mutual shading antarmodul dan tidak memasukkan bayangan dari batang, bracket, bangunan, maupun vegetasi sekitar.

**Gambar 4.** Near Shading Scene Pohon Surya pada Pvsyst

Sumber: Simulasi PVsyst 8, 2025

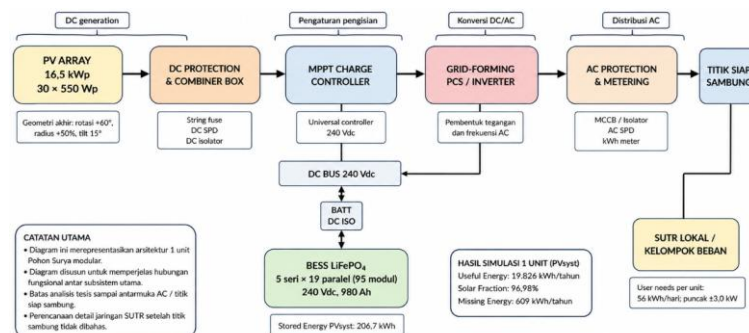
Simulasi Standalone dan Estimasi Biaya

Setelah geometri akhir diperoleh, model digunakan pada simulasi standalone PVsyst untuk menilai kemampuan sistem memenuhi User Needs satu unit. Sistem menggunakan array 16,5 kWp, baterai LiFePO₄ dengan konfigurasi 5S19P, Stored Energy PVsyst 206,7 kWh, dan autonomy empat hari. Untuk keperluan costing, kapasitas nominal baterai dihitung sebesar 228 kWh dari 95 battery-module-equivalent $\times$ 2,4 kWh (Mohammed et al., 2023). Perbedaan angka Stored Energy dan kapasitas nominal costing dipertahankan karena keduanya mewakili parameter yang berbeda pada pemodelan dan estimasi biaya.

Tabel 5. Parameter Utama Simulasi Standalone Satu Unit

Parameter	Nilai	Keterangan
Energi harian	56 kWh/hari	User Needs rata-rata satu unit.
Kapasitas PV	16,5 kWp	30 modul × 550 Wp.
Modul	LESSO CS6W-550D(HPM)72(182)	Modul monokristalin 550 Wp.
Jenis baterai	LiFePO ₄ Turbo Energy 48 V 2.4.1	Sistem penyimpanan energi.
Konfigurasi baterai	5S19P	95 battery-module-equivalent.
Stored Energy PVsyst	206,7 kWh	Parameter battery pack pada simulasi.
Autonomy	4 hari	Konfigurasi utama penelitian.
Charge controller	Universal Controller MPPT 240 V	Pengendali pengisian baterai.

Sumber: Hasil perancangan sistem dan simulasi PVsyst 8, 2025



Gambar 5. Skema Sistem Kelistrikan Satu Pohon Surya

Sumber: Hasil perancangan sistem kelistrikan, 2025

Batas desain kelistrikan satu unit ditetapkan sampai titik siap sambung ke SUTR. Perencanaan detail SUTR, analisis aliran daya, dan jatuh tegangan jaringan distribusi tidak termasuk dalam ruang lingkup penelitian. Estimasi biaya disusun pada tingkat konseptual berdasarkan jumlah komponen, referensi harga pasar, kebutuhan integrasi BESS/PCS, struktur, pekerjaan sipil awal, engineering, logistik, testing, contingency, dan PPN. Nilai estimasi tidak dimaksudkan sebagai HPS atau RAB konstruksi final.

Sumber Data dan Batas Analisis

Data penelitian tidak seluruhnya memiliki fungsi yang sama. Data kebutuhan energi, profil beban, dan radiasi digunakan sebagai masukan utama sizing dan simulasi, sedangkan spesifikasi komponen dan geometri digunakan untuk membangun model teknis. Data harga digunakan pada tahap akhir untuk memperkirakan konsekuensi investasi dari konfigurasi yang telah diperoleh. Pemisahan sumber dan fungsi data dilakukan agar setiap tahapan analisis dapat ditelusuri kembali.

Tabel 6. Data dan Sumber Data Penelitian

Data/parameter	Sumber	Penggunaan
Kebutuhan energi dan jumlah pelanggan	Skenario kebutuhan Desa Bungintende	Menentukan kebutuhan energi harian dan tahunan.
Profil beban harian	Profil beban acuan PLTS Tomia	Menyusun distribusi daya 24 jam dan beban puncak.

Data/parameter	Sumber	Penggunaan
Potensi energi surya	Global Solar Atlas dan Meteororm	Menentukan karakteristik sumber energi dan data simulasi.
Spesifikasi modul PV	Data modul 550 Wp	Menentukan kapasitas array dan parameter PV.
Geometri Pohon Surya	Model yang dikembangkan	Menentukan posisi panel, rotasi, radius, dan tilt.
Parameter penyimpanan	Model baterai dan konfigurasi PVsyst	Menentukan BESS dan autonomy sistem standalone.
Harga komponen dan pekerjaan	Harga pasar, produsen, harga lokal, dan asumsi penelitian	Menyusun estimasi investasi konseptual.

Sumber: Disusun oleh peneliti berdasarkan identifikasi data penelitian, 2025

Tabel 7. Cakupan dan Batas Analisis Penelitian

Aspek	Cakupan dan batas analisis
Geometri Pohon Surya	Optimasi berdasarkan mutual shading antarmodul; analisis struktur rinci tidak dilakukan.
Sistem kelistrikan	Mencakup PV, penyimpanan, konversi daya, proteksi, dan keluaran AC satu unit.
SUTR	Sistem dirancang hingga titik siap sambung; desain jaringan SUTR tidak dibahas.
Implementasi	Jumlah unit ditentukan dari kebutuhan energi desa tanpa perancangan distribusi rinci.
Biaya investasi	Estimasi berdasarkan konfigurasi teknis pada tingkat konseptual dan bukan RAB konstruksi final.

Sumber: Hasil simulasi optimasi parametrik PVsyst 8, 2025

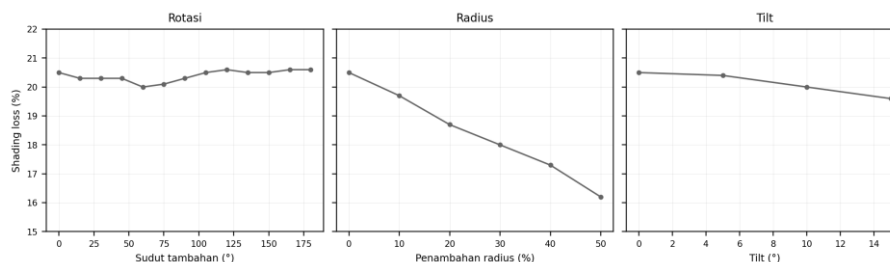
Batas tersebut penting dalam membaca hasil penelitian. Nilai shading loss merepresentasikan hubungan geometri antarmodul, sedangkan kinerja standalone merupakan hasil simulasi sistem energi dengan battery pack dan profil beban yang ditetapkan. Demikian pula, layout implementasi dan estimasi biaya merupakan tahap perencanaan konseptual dan belum menggantikan kebutuhan Detail Engineering Design apabila proyek akan dibangun.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Optimasi Geometri

Konfigurasi awal menghasilkan near shading loss sebesar 20,5%. Pada pengujian sudut rotasi tambahan, shading loss hanya berubah pada rentang 20,0–20,6%. Nilai terendah sebesar 20,0% diperoleh pada tambahan rotasi 60°. Perubahan yang relatif kecil menunjukkan bahwa rotasi panel mengelilingi pusat pohon belum secara langsung memperbesar jarak horizontal antarmodul, sehingga pengaruhnya terhadap pembayangan lebih terbatas dibandingkan radius.

Pengujian radius menunjukkan tren yang lebih jelas. Shading loss turun dari 20,5% pada konfigurasi dasar menjadi 19,7%; 18,7%; 18,0%; 17,3%; dan 16,2% pada penambahan radius 10–50%. Penurunan 4,3 poin persentase pada radius +50% setara dengan sekitar 21% dari nilai shading loss awal. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan jarak horizontal antarpanel merupakan parameter paling sensitif pada rentang uji yang digunakan. Pengujian tilt juga memberikan penurunan, tetapi lebih kecil, yaitu dari 20,5% pada 0° menjadi 19,6% pada tilt 15°.



Gambar 6. Pengaruh Sudut Rotasi, Penambahan Radius, dan Tilt terhadap Shading Loss
Sumber: Hasil simulasi optimasi parametrik PVsyst 8, 2025

Tabel 8. Hasil Iterasi Parametrik Optimasi Geometri

Variabel	Nilai uji	Shading loss	Keterangan
Rotasi	0°	20,5%	
Rotasi	15°	20,3%	
Rotasi	30°	20,3%	
Rotasi	45°	20,3%	
Rotasi	60°	20,0%	Terpilih
Rotasi	75°	20,1%	
Rotasi	90°	20,3%	
Rotasi	105°	20,5%	
Rotasi	120°	20,6%	
Rotasi	135°	20,5%	
Rotasi	150°	20,5%	
Rotasi	165°	20,6%	
Rotasi	180°	20,6%	
Radius	+0%	20,5%	
Radius	+10%	19,7%	
Radius	+20%	18,7%	
Radius	+30%	18,0%	
Radius	+40%	17,3%	
Radius	+50%	16,2%	Terpilih
Tilt	0°	20,5%	
Tilt	5°	20,4%	
Tilt	10°	20,0%	
Tilt	15°	19,6%	Terpilih

Sumber: Hasil simulasi optimasi parametrik PVsyst 8, 2025

Nilai terbaik dari masing-masing pengujian kemudian digabungkan, yaitu tambahan rotasi 60°, radius +50%, dan tilt 15°. Pada Loss Diagram model akhir, near shading loss tercatat sebesar 15,3%. Nilai 15,3% tidak diperlakukan sebagai nilai yang harus identik dengan hasil pengujian satu parameter secara terpisah karena konfigurasi akhir merupakan kombinasi beberapa perubahan geometri dan dievaluasi pada simulasi sistem tahunan.

Tabel 9. Perbandingan Parameter Geometri Model Awal dan Model Akhir

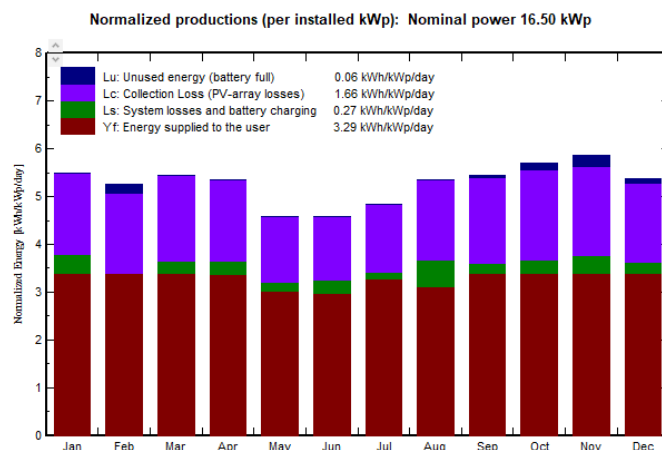
Parameter	Model awal	Model akhir	Perubahan
Jumlah modul	30	30	Tetap
Kapasitas	16,5 kWp	16,5 kWp	Tetap
Spacing vertikal	0,75 m	0,75 m	Tetap

Parameter	Model awal	Model akhir	Perubahan
Sudut dasar antarposisi	137,5°	137,5°	Tetap
Rotasi tambahan	0°	60°	+60°
Rentang bracket	0,1–3,4 m	0,2–5,1 m	Radius +50%
Tilt	0°	15°	+15°
Near shading loss	20,5%	15,3%	Turun 5,2 poin persentase

Sumber: Hasil pemodelan dan optimasi geometri, 2025

Kinerja Energi Satu Unit Pohon Surya

Simulasi standalone dilakukan menggunakan konfigurasi geometri akhir dan kebutuhan energi rata-rata 56 kWh/hari. Hasil tahunan menunjukkan Available Solar Energy sebesar 20.821 kWh/tahun dan Useful Energy sebesar 19.826 kWh/tahun. Energi yang tidak dimanfaatkan sebesar 354 kWh/tahun, sedangkan Missing Energy sebesar 609 kWh/tahun. Nilai Solar Fraction 96,98% menunjukkan bahwa sebagian besar kebutuhan energi pada profil rujukan dapat dipenuhi oleh satu unit, namun masih terdapat periode ketika energi dari array dan baterai belum mencukupi beban.



Gambar 7. Normalized Productions Satu Unit Pohon Surya Hasil Simulasi Standalone

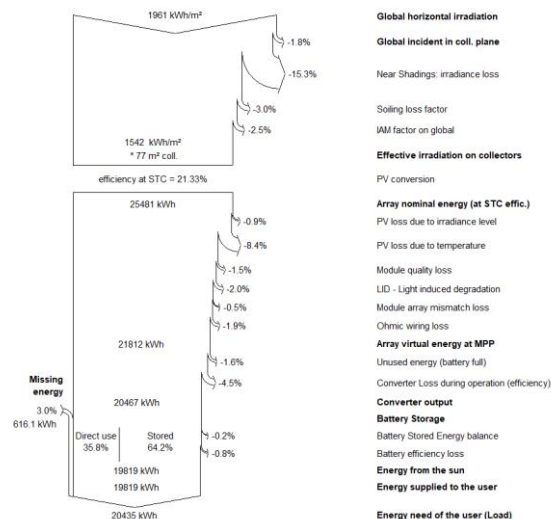
Sumber: Hasil simulasi PVsyst 8, 2025

Tabel 10. Ringkasan Hasil Simulasi Satu Unit Pohon Surya

Parameter	Nilai	Satuan
Kapasitas terpasang	16,5	kWp
Jumlah modul	30	modul
Kebutuhan energi harian	56,0	kWh/hari
Useful Energy	19.826	kWh/tahun
Available Solar Energy	20.821	kWh/tahun
Unused Energy	354	kWh/tahun
Missing Energy	609	kWh/tahun
Specific Production	1.202	kWh/kWp/tahun
Performance Ratio	62,42	%
Solar Fraction	96,98	%

Sumber: Hasil simulasi PVsyst 8, 2025

Normalized productions memperlihatkan Final Yield tahunan rata-rata sekitar 3,29 kWh/kWp/hari dan Array Yield sekitar 3,56 kWh/kWp/hari. Final Yield terendah terjadi pada Juni, sekitar 2,98 kWh/kWp/hari, sejalan dengan GHI minimum pada periode tersebut. Perbedaan Array Yield dan Final Yield menunjukkan adanya kehilangan energi pada sisi sistem sebelum energi dapat digunakan oleh beban. Performance Ratio 62,42% pada simulasi standalone tidak sama dengan PR 0,78 pada preliminary sizing karena PR awal merupakan asumsi untuk perhitungan kapasitas, sedangkan PR simulasi merupakan keluaran berdasarkan model, losses, konfigurasi penyimpanan, dan operasi sistem (Almadhhachi et al., 2022).

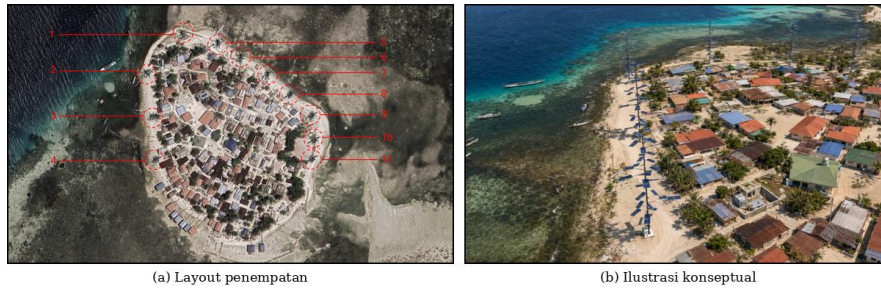


Gambar 8. Loss Diagram Satu Unit Pohon Surya Hasil Simulasi
Sumber: Hasil simulasi PVsyst 8, 2025

Loss Diagram menunjukkan near shading loss sebesar 15,3% sebagai salah satu komponen kehilangan pada sisi iradiasi. Selain itu terdapat soiling sekitar 3,0%, Incidence Angle Modifier sekitar 2,5%, serta rugi temperatur modul sekitar 8,4%. Dengan demikian, penurunan mutual shading melalui optimasi geometri belum menghilangkan rugi-rugi lain yang berasal dari karakteristik modul, konversi daya, penyimpanan, dan pola beban. Hasil ini juga menunjukkan alasan simulasi standalone perlu dilakukan setelah optimasi geometri, karena kinerja akhir tidak dapat dinilai hanya dari satu parameter shading.

Perencanaan Implementasi pada Skala Desa

Jumlah unit akhir ditentukan menggunakan kebutuhan energi tahunan desa dan Useful Energy tahunan satu unit. Perbandingan 204.400 kWh/tahun terhadap 19.826 kWh/tahun menghasilkan kebutuhan teoritis sekitar 10,31 unit. Karena unit implementasi harus berupa bilangan bulat, jumlah tersebut dibulatkan menjadi 11 unit. Kapasitas total menjadi 181,5 kWp dengan 330 modul dan Useful Energy teoritis sekitar 218.086 kWh/tahun. Nilai tersebut memberi margin energi agregat terhadap kebutuhan tahunan desa sebagai konsekuensi dari pembulatan sistem modular.



Gambar 9. Visual Konseptual Implementasi Pohon Surya di Desa Bungintende: (a) layout penempatan 11 unit, (b) ilustrasi pada kawasan pesisir
Sumber: Hasil perencanaan implementasi konseptual, 2025

Tabel 11. Rekapitulasi Implementasi di Desa Bungintende

Parameter	Nilai
Kebutuhan energi desa	204.400 kWh/tahun
Useful Energy per unit	19.826 kWh/tahun
Kebutuhan teoritis	10,31 unit
Jumlah implementasi	11 unit
Kapasitas total	181,5 kWp
Jumlah modul	330 modul
Useful Energy teoritis	218.086 kWh/tahun
Rata-rata pelanggan per unit	≈13 pelanggan

Sumber: Hasil perhitungan berdasarkan simulasi PVsyst, 2025

Jika 140 calon pelanggan didistribusikan secara merata, satu unit secara ekuivalen melayani sekitar 12,7 atau 13 pelanggan. Nilai ini merupakan gambaran skala pelayanan, bukan pembagian jaringan yang bersifat tetap. Pada tahap implementasi rinci, pembagian pelanggan perlu mempertimbangkan sebaran lokasi, profil beban aktual, kapasitas feeder, jatuh tegangan, serta konfigurasi SUTR. Posisi unit pada Gambar 9 juga bersifat konseptual dan perlu diverifikasi terhadap hak guna lahan, akses pemeliharaan, bayangan bangunan/vegetasi, dan kondisi struktur tanah.

Estimasi Biaya Investasi

Estimasi direct cost satu unit Pohon Surya sebesar Rp1,744 miliar. Komponen terbesar adalah battery modules sekitar Rp1,012 miliar, disusul BESS integration, PCS, dan shelter sekitar Rp415,92 juta. Modul PV sendiri sekitar Rp52,49 juta. Dominasi komponen penyimpanan menunjukkan bahwa pilihan autonomy dan kapasitas BESS mempunyai pengaruh langsung terhadap total investasi sistem standalone.

Tabel 12. Estimasi Direct Cost Satu Unit Pohon Surya

Kelompok biaya	Biaya (Rp juta)	Keterangan
Modul PV	52,49	30 modul 550 Wp
DC electrical BOS	52,79	Kabel, konektor, proteksi, grounding
Battery modules	1.011,75	95 modul baterai ekuivalen

Kelompok biaya	Biaya (Rp juta)	Keterangan
BESS integration, PCS, shelter	415,92	BMS, rack, PCS, enclosure, commissioning
AC interface ke SUTR	24,23	Panel AC, metering, feeder pendek
Struktur dan sipil	186,75	Struktur baja, fabrikasi, erection, pondasi awal
Total direct cost	1.743,93	Per unit

Sumber: Hasil perhitungan berdasarkan simulasi PVsyst 8, 2025

Tabel 13. Estimasi Biaya Proyek untuk Implementasi 11 Unit

Komponen biaya proyek	Biaya (Rp)
Direct cost 11 unit	19.183.222.294
Engineering dan design review	575.496.669
Logistik, packing, mobilisasi	448.159.250
Project testing, dokumentasi, training	383.664.446
Monitoring, communication, initial spare/tools	70.000.000
Subtotal sebelum contingency	20.660.542.659
Contingency 10%	2.066.054.266
Subtotal sebelum PPN	22.726.596.925
PPN efektif 11%	2.499.925.662
Total estimasi investasi	25.226.522.587

Sumber: Estimasi biaya berdasarkan harga pasar dan asumsi penelitian, 2025

Berdasarkan pengelompokan biaya, komponen EPC mencapai Rp20,661 miliar atau 81,90% dari total investasi, sedangkan komponen Non-EPC berupa contingency dan PPN sekitar Rp4,566 miliar atau 18,10%. Nilai total setara sekitar Rp138,99 juta/kWp dan sekitar Rp180,19 juta per calon pelanggan. Angka tersebut merupakan estimasi konseptual. Harga aktual perlu diperbarui melalui quotation pemasok, kajian struktur dan geoteknik, serta desain rinci apabila proyek masuk tahap implementasi.

Tabel 14. Sensitivitas Investasi terhadap Autonomy Baterai

Autonomy	Baterai/Pohon	BESS	Investasi total	Rp juta/kWp	Status
1 hari	24	57,6 kWh	Rp11,23 miliar	61,88	Skenario
2 hari	48	115,2 kWh	Rp15,96 miliar	87,94	Skenario
3 hari	72	172,8 kWh	Rp20,69 miliar	114,01	Skenario
4 hari	95	228,0 kWh	Rp25,23 miliar	138,99	Utama

Sumber: Hasil perhitungan sensitivitas berdasarkan estimasi biaya, 2025

Analisis sensitivitas menunjukkan total investasi turun secara signifikan ketika autonomy dikurangi. Namun, skenario satu sampai tiga hari belum dinilai ulang melalui simulasi PVsyst dengan profil beban yang sama, sehingga tidak dapat langsung dinyatakan memberikan tingkat keandalan yang setara dengan konfigurasi empat hari. Untuk itu, sensitivitas biaya

diperlakukan sebagai gambaran pengaruh kapasitas penyimpanan terhadap investasi, bukan sebagai rekomendasi final perubahan autonomy.

Pembahasan Integrasi Desain, Energi, dan Biaya

Hasil preliminary sizing sebesar 154,40 kWp lebih rendah dibandingkan kapasitas implementasi akhir 181,5 kWp. Perbedaan tersebut tidak menunjukkan inkonsistensi perhitungan karena kedua nilai diperoleh pada tahap yang berbeda. Preliminary sizing menggunakan kebutuhan harian, GHI desain terendah, dan PR asumsi 0,78 sebagai pendekatan awal. Kapasitas implementasi akhir ditentukan setelah simulasi satu unit 16,5 kWp menghasilkan Useful Energy 19.826 kWh/tahun, kemudian kebutuhan teoritis 10,31 unit dibulatkan menjadi 11 unit. Dengan demikian, kapasitas 181,5 kWp merupakan konsekuensi dari karakteristik kinerja aktual model dan sifat modular unit yang tidak dapat ditambahkan dalam pecahan unit.

Dari sisi geometri, peningkatan radius memberikan pengaruh paling besar terhadap penurunan mutual shading, tetapi pada saat yang sama memperbesar bentang struktur. Penambahan radius +50% dipilih karena menghasilkan shading loss terendah pada rentang yang diuji, bukan karena telah dibuktikan sebagai optimum struktural. Penelitian belum mengevaluasi tegangan batang, lendutan bracket, sambungan, beban angin pesisir, maupun kapasitas pondasi. Oleh sebab itu, keuntungan energi dari radius yang lebih besar perlu diuji kembali terhadap kebutuhan material (Machín & Márquez, 2024) dan keamanan struktur pada tahap perencanaan rinci.

Dari sisi sistem energi dan biaya, konfigurasi standalone membutuhkan penyimpanan yang besar karena profil beban tertinggi terjadi pada malam hari, sedangkan produksi PV terutama tersedia pada siang hari. Kondisi tersebut menjelaskan mengapa battery modules dan integrasi BESS menjadi komponen biaya dominan. Apabila pada tahap berikutnya tersedia jaringan interkoneksi, sumber pembangkit pendamping, demand-side management, atau profil beban aktual yang berbeda, kapasitas baterai dan total investasi dapat berubah secara signifikan. Karena itu, biaya Rp25,23 miliar sebaiknya dipahami sebagai estimasi untuk konfigurasi utama empat hari autonomy yang digunakan pada penelitian ini, bukan sebagai satu-satunya konfigurasi yang mungkin diterapkan.

Konsep Pohon Surya memberikan keuntungan utama pada penyusunan modul secara vertikal sehingga tidak memerlukan hamparan array horizontal seperti PLTS ground-mounted (Budiyanto et al., 2021). Namun, penelitian ini tidak menghitung secara eksplisit rasio penghematan luas lahan terhadap PLTS konvensional. Untuk memperoleh klaim efisiensi lahan yang kuantitatif, studi lanjutan perlu membandingkan footprint struktur, area bebas bayangan, jarak aman antarpohon, dan kebutuhan akses pemeliharaan terhadap konfigurasi PLTS konvensional dengan energi tahunan yang setara.

KESIMPULAN

Penelitian menghasilkan rancangan satu unit Pohon Surya standalone modular berkapasitas 16,5 kWp menggunakan 30 modul fotovoltaik 550 Wp. Model awal menggunakan pola Fibonacci yang disimplifikasi dengan offset sudut dasar 137,5°, spacing vertikal 0,75 m, dan delapan kelompok panjang bracket. Optimasi parametrik menunjukkan bahwa radius/panjang bracket merupakan variabel yang paling sensitif terhadap mutual shading pada rentang pengujian. Konfigurasi akhir menggunakan tambahan rotasi 60°, penambahan radius

50%, dan tilt 15°. Near shading loss pada model akhir tercatat 15,3%, lebih rendah dibandingkan kondisi awal 20,5%.

Pada simulasi standalone, satu unit menghasilkan Useful Energy 19.826 kWh/tahun, Available Solar Energy 20.821 kWh/tahun, Specific Production 1.202 kWh/kWp/tahun, Performance Ratio 62,42%, Solar Fraction 96,98%, dan Missing Energy 609 kWh/tahun. Berdasarkan kebutuhan energi Desa Bungintende 204.400 kWh/tahun, diperlukan 11 unit atau kapasitas total 181,5 kWp dengan Useful Energy teoritis 218.086 kWh/tahun. Estimasi investasi konseptual sebesar sekitar Rp25,23 miliar dan komponen penyimpanan energi menjadi bagian biaya dominan. Hasil tersebut menunjukkan Pohon Surya modular berpotensi menjadi alternatif PLTS standalone pada wilayah kepulauan dengan keterbatasan lahan, tetapi keputusan implementasi tetap memerlukan verifikasi teknis lebih lanjut.

Kajian berikutnya disarankan mencakup analisis struktur batang, bracket, sambungan, pondasi, beban angin, dan data geoteknik lokasi. Optimasi geometri juga dapat dikembangkan menggunakan metode yang mengevaluasi kombinasi rotasi, radius, tilt, dan jumlah modul secara simultan. Pada sisi sistem tenaga, diperlukan simulasi ulang untuk alternatif autonomy baterai, analisis distribusi SUTR, aliran daya dan jatuh tegangan, serta pembagian beban aktual per unit. Analisis shading dapat diperluas dengan memasukkan bayangan batang, bracket, bangunan, vegetasi, dan objek sekitar agar representasi kondisi operasi semakin mendekati implementasi lapangan.

REFERENSI

- Almadhhachi, M., Seres, I., & Farkas, I. (2022). Significance of solar trees: Configuration, operation, types and technology commercialization. In *Energy Reports* (Vol. 8). <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.015>
- Asyifah, C., Firmansyah, M. A., & Budiman, D. A. (2024). Kasus Bullying Dunia Pendidikan di Indonesia dari Perspektif Media dan Pemberitaannya. *Syntax Literate ; Jurnal Ilmiah Indonesia*, 9(1). <https://doi.org/10.36418/syntax-literate.v9i1.14855>
- Budiyanto, H., Tutuko, P., Boedi Setiawan, A., Jati, R. M. B., & Iqbal, M. (2021). Listrik Tenaga Surya untuk Pompa Submersible pada Greenhouse Hidrokanik di Kabupaten Malang. *Abdimas: Jurnal Pengabdian Masyarakat Universitas Merdeka Malang*, 6(3). <https://doi.org/10.26905/abdimas.v6i3.5298>
- Dierauf, T., Growitz, A., Kurtz, S., & Hansen, C. (2013). Weather-Corrected Performance Ratio Technical Report NREL/TP-5200-57991. *Technical Report NREL/TP-5200-57991*, (AprilNREL/TP-5200-57991).
- Franklin, & Ed. (2018). Solar Photovoltaic (PV) System Components. *University of Arizona - Cooperative Extension*, (May).
- Gangwar, P., Tripathi, R. P., & Singh, A. K. (2025). Solar photovoltaic tree: a review of designs, performance, applications, and challenges. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 47(1). <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1901802>
- Gonçalves de Bem, L., Oliveira Filho, D., Imbuzeiro, H. M. A., Pereira Oliveira, J. V., Motoike, S. Y., Maciel da Costa, V., & Filho, D. L. (2022). Solar photovoltaic tree multi aspects analysis – a review. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 7. <https://doi.org/10.1051/rees/2022014>
- Gopi, A., Sudhakar, K., Keng, N. W., & Krishnan, A. R. (2021). Comparison of normal and weather corrected performance ratio of photovoltaic solar plants in hot and cold climates. *Energy for Sustainable Development*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.09.005>

- Hasrul, R. (2021). Sistem Pendinginan Aktif Versus Pasif Di Meningkatkan Output Panel Surya. *Jurnal Sain, Energi, Teknologi & Industri*, 5(2).
- Humas EBTKE. (2020). Indonesia Kaya Energi Surya, Pemanfaatan Listrik Tenaga Surya oleh Masyarakat Tidak Boleh Ditunda. In *Siaran Pers*.
- Jamal, J., Mansur, I., Rasid, A., Mulyadi, M., Dihyah Marwan, M., & Marwan, M. (2024). Evaluating the shading effect of photovoltaic panels to optimize the performance ratio of a solar power system. *Results in Engineering*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101878>
- Kaur, G., & Singh, M. (2021). Performance Analysis of Solar Tree. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, 12(01).
- Krunal Hindocha, & Dr. Sweta Shah. (2020). Design of 50 MW Grid Connected Solar Power Plant. *International Journal of Engineering Research And*, V9(04). <https://doi.org/10.17577/ijertv9is040762>
- Lee, Y. K. (2019). The effect of active material, conductive additives, and binder in a cathode composite electrode on battery performance. *Energies*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/en12040658>
- Machín, A., & Márquez, F. (2024). Advancements in Photovoltaic Cell Materials: Silicon, Organic, and Perovskite Solar Cells. In *Materials* (Vol. 17, Number 5). <https://doi.org/10.3390/ma17051165>
- Mohammed, A. S., Atnaw, S. M., Salau, A. O., & Eneh, J. N. (2023). Review of optimal sizing and power management strategies for fuel cell/battery/super capacitor hybrid electric vehicles. In *Energy Reports* (Vol. 9). <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.042>
- Praswanto, D. H., Djiwo, S., & Palevi, B. R. P. D. (2023). Analysis of Hydrogen Gas Production Results in Water Electrolysis Process on Genset Characteristics. *JOURNAL OF SCIENCE AND APPLIED ENGINEERING*, 6(1). <https://doi.org/10.31328/jsae.v6i1.4236>
- Rajae, M., & Jalali, M. (2022). Analysis and implementation of the solar tree by determining the optimal angle in Shiraz-Iran. *Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering*, 12(1). <https://doi.org/10.22061/jcarme.2021.8079.2076>
- Ruffing, A. M., Jensen, T. J., & Strickland, L. M. (2016). Genetic tools for advancement of *Synechococcus* sp. PCC 7002 as a cyanobacterial chassis. *Microbial Cell Factories*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-016-0584-6>
- Samsurizal, Mauriraya, K. T., Fikri, M., Pasra, N., & Christiono. (2021). Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). In *Institut Teknologi PLN*.
- Sanjaya, W., Yandri, & Hiendro, A. (2024). Solar Power Plant (PLTS) Planning Based on Pvsyst Software in the Joint Lecture Building-B Tanjungpura University. *Computers, and Electricals Engineering Journal (TELECTRICAL)*, 2(1).