

Analisis Tekno-Ekonomi Penggantian Komponen PLTS yang Mengalami Degradasi Menggunakan PVsyst Studi Kasus UG Technopark

Setiyono*, Sandi Suryo Prayoga, Dhatu Paragya, Mochamad Karjadi

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Gunadarma, Jakarta

*Koresponden email: setiyono@staff.gunadarma.ac.id

Diterima: 23 April 2026

Disetujui: 30 April 2026

Abstract

The degradation of components in solar photovoltaic (PV) systems has become a critical issue affecting energy supply reliability and operational efficiency, particularly in small- to medium-scale installations. This condition leads to suboptimal energy production and increased dependence on the utility grid. Therefore, this study aims to analyze the techno-economic feasibility of component replacement (repowering) in a 10.8 kWp PV system located at the Agricultural Technology Zone of UG Technopark. The study was conducted by comparing the existing system condition, which has experienced degradation, with a proposed repowering scenario using PVsyst software. The data used include actual operational data, technical specifications of components, and local meteorological data. The technical parameters analyzed consist of annual energy production, Performance Ratio (PR), and system losses, while the economic analysis includes Net Present Value (NPV), Levelized Cost of Energy (LCOE), and Payback Period (PBP). The results indicate that the existing system is not able to meet energy demand optimally, with a dependency on the utility grid of approximately 44–52%. After repowering, through the replacement of the inverter and battery as well as system configuration optimization, the operational performance shows improved energy supply stability and more efficient utilization of solar energy.

Keywords: *techno economic analysis, ug techno park, performance ratio, net present value, photovoltaic system degradation*

Abstrak

Penurunan kinerja sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) akibat degradasi komponen menjadi permasalahan utama dalam menjaga keandalan suplai energi dan efisiensi operasional, khususnya pada sistem PLTS berkapasitas kecil-menengah. Kondisi ini menyebabkan produksi energi tidak optimal serta meningkatnya ketergantungan terhadap jaringan listrik konvensional. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kelayakan tekno-ekonomi dari penggantian komponen (repowering) pada sistem PLTS berkapasitas 10,8 kWp di Zona Teknologi Pertanian UG Technopark. Studi dilakukan dengan membandingkan kondisi sistem eksisting yang telah mengalami degradasi dengan skenario repowering yang diusulkan menggunakan perangkat lunak PVsyst. Data yang digunakan meliputi data operasional aktual, spesifikasi teknis komponen, serta data meteorologi lokal. Parameter teknis yang dianalisis terdiri dari produksi energi tahunan, Performance Ratio (PR), dan rugi-rugi sistem, sedangkan analisis ekonomi mencakup Net Present Value (NPV), Levelized Cost of Energy (LCOE), dan Payback Period (PBP). Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem eksisting belum mampu memenuhi kebutuhan energi secara optimal, dengan ketergantungan terhadap jaringan listrik PLN sekitar 44–52%. Setelah dilakukan repowering melalui penggantian inverter dan baterai serta optimasi konfigurasi sistem, kinerja operasional menunjukkan peningkatan stabilitas suplai energi dan pemanfaatan energi surya yang lebih efisien.

Kata Kunci: *analisis tekno ekonomi, ug techno park, rasio kinerja, net present value, degradasi sistem fotovoltaik*

1. Pendahuluan

Sistem energi terbarukan hibrida berkembang sebagai solusi untuk mengatasi sifat intermittent sub energi seperti surya dan angin, sekaligus meningkatkan keandalan suplai energi [1][2]. Dalam dua dekade terakhir, teknologi fotovoltaik (PV) mengalami pertumbuhan pesat yang didorong oleh penurunan biaya investasi, peningkatan efisiensi modul, serta kemajuan sistem konversi daya dan penyimpanan energi [3][4]. Negara beriklim tropis seperti Indonesia memiliki potensi besar dalam pemanfaatan energi surya karena tingkat iradiasi yang tinggi dan stabil, sehingga PLTS menjadi elemen strategis dalam mendukung

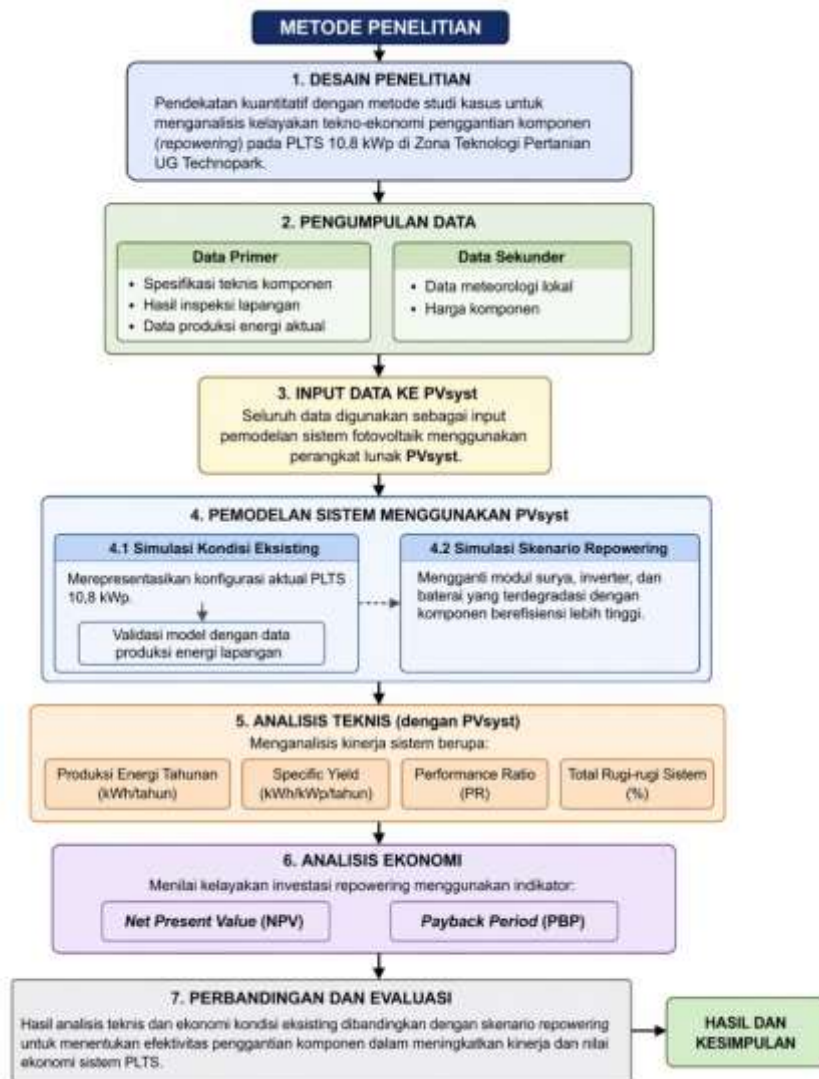
ketahanan energi dan pengurangan emisi karbon [5][6]. Namun, kinerja jangka panjang sistem PLTS menghadapi berbagai tantangan, terutama akibat degradasi komponen seiring waktu [7][8][9]. Faktor lingkungan, material dan keausan menyebabkan penurunan performa modul, inverter, dan baterai, yang berdampak pada turunnya produksi energi dan meningkatnya biaya investasi jangka panjang [10][11].

Dalam kondisi ini, pemeliharaan konvensional sering kali tidak cukup untuk memulihkan kinerja sistem secara optimal [12]. Oleh karena itu, strategi repowering melalui penggantian komponen dengan teknologi yang lebih efisien menjadi pendekatan yang semakin relevan [13][14] [15][16]. Beberapa studi menunjukkan bahwa repowering dapat meningkatkan produksi energi, menurunkan biaya energi (LCOE), serta memperpanjang umur ekonomis sistem [17][18]. Namun implementasinya memerlukan analisis tekno-ekonomi yang komprehensif berbasis data dan simulasi [19]. Perangkat lunak PVsyst banyak digunakan untuk memodelkan kinerja dan kelayakan ekonomi sistem PLTS secara akurat [20][21]. Meskipun demikian, kajian yang mengintegrasikan data operasional aktual dengan skenario repowering pada sistem PLTS yang telah beroperasi masih terbatas khususnya di sektor pertanian [22] [23]. PLTS berkapasitas 10,8 kWp di zona teknologi pertanian UG Technopark merupakan salah satu infrastruktur penting yang menunjukkan indikasi penurunan performa akibat degradasi komponen. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kelayakan tekno-ekonomi repowering melalui simulasi PVsyst dengan membandingkan kondisi eksisting dan skenario penggantian komponen. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar pengambilan keputusan dalam optimalisasi dan rehabilitasi sistem PLTS secara berkelanjutan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode studi kasus untuk menganalisis kelayakan tekno-ekonomi penggantian komponen (*repowering*) pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berkapasitas 10,8 kWp yang berlokasi di Zona Teknologi Pertanian UG Technopark. **Gambar 1** merupakan langkah kerja dari penelitian yang dilakukan. Analisis dilakukan dengan membandingkan kinerja sistem pada kondisi eksisting dan skenario repowering yang diusulkan. Data yang digunakan terdiri dari data primer berupa spesifikasi teknis komponen, hasil inspeksi lapangan, dan data produksi energi aktual, serta data sekunder berupa data meteorologi lokal dan harga komponen. Seluruh data digunakan sebagai input pemodelan sistem fotovoltaik menggunakan perangkat lunak PVsyst. Pemodelan sistem dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama adalah simulasi kondisi eksisting yang merepresentasikan konfigurasi aktual PLTS, kemudian divalidasi menggunakan data produksi energi lapangan.

Tahap kedua adalah simulasi skenario repowering dengan mengganti modul surya, inverter, dan baterai yang terdegradasi dengan komponen berefisiensi lebih tinggi. PVsyst digunakan untuk menganalisis produksi energi tahunan, performance ratio (PR), serta rugi-rugi sistem. Evaluasi kinerja teknis dilakukan berdasarkan parameter produksi energi tahunan, *specific yield*, PR, dan total rugi-rugi sistem. Selanjutnya, analisis ekonomi dilakukan untuk menilai kelayakan investasi repowering menggunakan indikator *net present value* (NPV) dan *payback period* (PBP). Hasil analisis teknis dan ekonomi dibandingkan untuk menentukan efektivitas penggantian komponen dalam meningkatkan kinerja dan nilai ekonomi sistem PLTS.



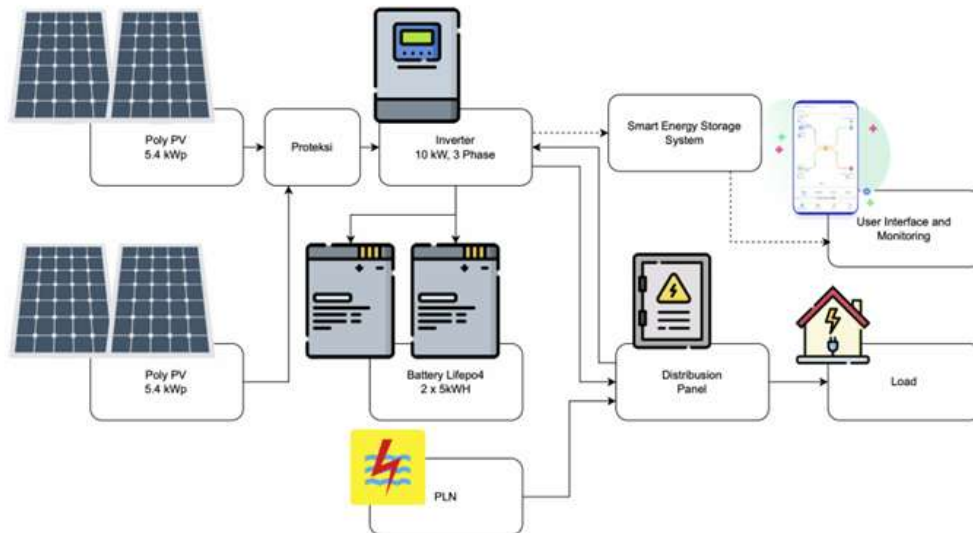
Gambar 1 . Alur Kerja dari Metode Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

PLTS UG Techno Park

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dan berperan penting dalam mendukung efisiensi serta kemandirian energi, terutama di sektor pertanian modern. Zona Teknologi Pertanian di UG Technopark menjadi pusat penerapan teknologi pertanian cerdas yang membutuhkan pasokan listrik stabil untuk mendukung sistem seperti smart greenhouse dan perangkat berbasis Internet of Things (IoT). **Gambar 2** menunjukkan sistem PLTS hybrid di Zona Teknologi Pertanian UG Technopark yang menggabungkan panel surya, baterai lithium, dan jaringan PLN secara otomatis. Total kapasitas panel mencapai 10,8 kWp yang terhubung ke inverter 10 kW tiga fasa untuk mengubah arus DC menjadi AC dan menyalurkan energi ke beban melalui panel distribusi. Sistem ini dilengkapi baterai lithium 2×5 kWh untuk penyimpanan energi (pemenuhan kebutuhan kapasitas baterai disesuaikan dengan anggaran yang seharusnya sesuai perhitungan membutuhkan 30 kWh namun pelaksanaan baru 10 kWh).

Sistem dilengkapi Smart Energy Storage System yang memungkinkan pemantauan produksi, konsumsi, dan status baterai secara real-time, mendukung penerapan smart and sustainable agriculture di Technopark. Sistem PLTS yang telah terpasang sebelumnya mengalami penurunan performa akibat usia pakai dan kondisi teknis, sehingga perlu dilakukan revitalisasi PLTS Zona Teknologi Pertanian. Kegiatan ini bertujuan mengembalikan fungsi dan efisiensi sistem melalui pemeriksaan, penggantian serta penataan ulang komponen agar sesuai kebutuhan energi terkini. Revitalisasi ini diharapkan mampu mendukung keberlanjutan operasional dan memperkuat penerapan konsep smart and sustainable agrikultur di lingkungan UG Technopark.



Gambar 2. Single Line Diagram Sistem PLTS UG Technopark

Tabel 1. Informasi Teknis Sistem PLTS di UG Techno Park

Komponen	Kapasitas	Keterangan
Total PV	10.8 kW	36×150Wp + 18×300Wp
Inverter Hybrid	10 kW	Terintegrasi dengan controller dan ATS otomatis, Produk: Deye 10K-SG04LP3-EU
Baterai Lithium	48V, 200Ah ≈ 10 kWh	Cukup untuk suplai beban 2.2kW selama ±4 jam Produk: Lithtech 51.2V 100Ah, 2 unit.
Panel Proteksi	40 Ampere	Selector dan Proteksi Listrik
Jenis Sistem	Hybrid PLTS + PLN	Sumber prioritas: PV > Baterai > PLN
Beban	Pompa Air Lampu Penerangan Jalan Sistem Pendingin Baterai	800 W konsumsi energi per hari 19200 Wh 1000 W dengan konsumsi per hari 12000 Wh 400 W pemakaian energi per hari 800 Wh

Daya Total Panel Surya (PV Array)

Solar panel existing terdiri dari dua bagian ground mount dengan kapasitas total:

$$PV_{existing} = (18 \times 300 W_p) + (36 \times 150 W_p) = (5400 + 5400) = 10800 W_p = 10.8 kW_p$$

Jadi total kapasitas solar panel adalah existing saat ini 10,8 kWp. Sedangkan jika berdasarkan hitungan kapasitas solar panel yang dibutuhkan dengan PSH adalah:

$$PV_{existing} = \frac{\text{Total Energi Harian} \times 1.25}{\text{Peak Sun Hour (PSH)}}$$

$$PV_{existing} = \frac{34400 \times 1,25}{4,1} = 10488 W_p$$

Maka solar panel existing masih dinyatakan mencukupi kebutuhan energi total harian.

Kapasitas Baterai

Berdasarkan survei kebutuhan diketahui: Energi total harian saat ini = 34400 Wh Waktu operasi mandiri yang diinginkan (tanpa PLN atau PV): 4 jam (karena keterbatasan anggaran) Sistem DC: 48 V Efisiensi inverter: 90% Depth of Discharge (DoD) untuk baterai lithium: 80% Kapasitas Baterai per Unit: 100 Ah Perhitungan kebutuhan baterai: a. Energi yang dibutuhkan:

$$E_{Load} = \text{Total Energi Harian} \times 1,25$$

$$E_{Load} = 34400 \times 1,25 = 7166 \text{ Wh}$$

Energi yang harus disediakan baterai:

$$E_{BAT} = \frac{E_{Load} \times 1,25}{\text{efisiensi} \times \text{DoD}}$$

$$E_{BAT} = \frac{7166 \times 1,25}{0,9 \times 08} = 10 \text{ kWh}$$

Kapasitas Baterai dalam (Ah)

$$C_{BAT} = \frac{E_{BAT}}{V_{sistem}} = \frac{10.000}{48} = 208 \text{ Ah}$$

Jumlah Baterai

$$N_{BAT} = \frac{C_{BAT}}{C_{BATSpec}} = \frac{208}{100} \approx 2 \text{ Unit}$$

Berdasarkan perhitungan yang dibulatkan dibutuhkan 200 Ah untuk kapasitas baterai dengan tegangan sistem 48V. Dipilih unit baterai Lithium 48V 100AH dengan brand Lithtech sebanyak 2 unit.

Inverter

Inverter harus mampu menangani beban (2.2 kW) jika berdasarkan data pengukuran, dan juga menyesuaikan dengan MCCB 3 fasa (40 A, 8.8 kVA) yang ada di zona tersebut dan juga menyesuaikan dengan kapasitas PV. Umumnya, kapasitas inverter disarankan antara 80–125% dari total beban.

$$P_{INV} = 1,25 \times P_{LOAD} = 1,25 \times 8,8 \text{ kVA} = 11 \text{ kVA} \approx 10 \text{ kW}$$

Maka dipilih inverter 10 kW hybrid dengan brand dan type Deye 10K-SG04LP3-EU

Data Operasional Aktual dan Grafik Kinerja PLTS

Data operasional aktual sistem PLTS 10,8 kWp diperoleh dari platform monitoring inverter dan sistem manajemen energi yang merekam aliran energi secara periodik. Data ini mencakup produksi energi dari modul fotovoltaik, konsumsi beban, impor energi dari jaringan PLN, serta proses pengisian dan pengosongan baterai. Visualisasi data disajikan dalam bentuk grafik *Solar & Utilization* dan *Generation & Usage History* untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai pola operasi sistem dalam kondisi nyata.



Gambar 3. Grafik *Solar & Utilization* periode Desember 2025 – Januari 2026

Gambar 3 menampilkan grafik *Solar & Utilization* pada periode Januari dan Februari 2026. Grafik tersebut menunjukkan bahwa pemenuhan energi beban masih didominasi oleh impor dari jaringan PLN dengan porsi sekitar 47–52% dari total konsumsi energi. Kontribusi energi dari modul surya berada pada kisaran 28–32%, sedangkan sisanya dipenuhi oleh energi hasil pelepasan baterai dengan porsi sekitar 19–20%. Komposisi ini mengindikasikan bahwa tingkat pemanfaatan energi surya secara langsung masih terbatas dan sistem masih memiliki ketergantungan yang cukup tinggi terhadap pasokan energi eksternal.

Gambar 4 memperlihatkan distribusi energi hasil produksi modul surya. Sebagian besar energi produksi digunakan langsung untuk memenuhi kebutuhan beban dengan porsi sekitar 55–59%, sedangkan energi selebihnya dialokasikan untuk pengisian baterai dengan porsi 41–45%. Pola ini menunjukkan bahwa sistem baterai berfungsi sebagai penyeimbang energi, terutama untuk menyimpan kelebihan produksi pada siang hari agar dapat dimanfaatkan kembali pada periode beban tinggi atau saat produksi surya menurun.



Gambar 4. Grafik Solar & Utilization periode Desember 2025 – Januari 2026



Gambar 5. Generation & Usage periode Desember 2025 Gambar 6. Generation & Usage periode Januari 2026

Gambar 5 dan Gambar 6 menyajikan grafik *Generation & Usage History* yang menggambarkan profil harian produksi, konsumsi, impor jaringan, serta aktivitas baterai selama satu bulan pengamatan. Produksi energi harian relatif stabil pada kisaran 35–50 kWh per hari namun masih berada di bawah tingkat konsumsi energi harian. Selisih antara produksi dan konsumsi tersebut dipenuhi melalui impor energi dari jaringan PLN dan pelepasan energi dari baterai. Aktivitas pengisian dan pengosongan baterai yang terjadi hampir setiap hari menunjukkan siklus kerja baterai yang cukup intensif, yang dalam jangka panjang berpotensi mempengaruhi umur pakai sistem penyimpanan energi. Secara keseluruhan, data operasional aktual dan grafik kinerja PLTS menunjukkan bahwa sistem eksisting belum mampu memenuhi kebutuhan energi secara mandiri. Kondisi ini memperkuat indikasi adanya penurunan kinerja sistem dan keterbatasan kapasitas terpasang, sehingga menjadi dasar yang kuat untuk dilakukan analisis lebih lanjut melalui simulasi PVsyst dan evaluasi skenario repowering pada tahap berikutnya.

Analisis Biaya dan Kelayakan Ekonomi Sistem PLTS

Parameter dan data perencanaan sistem PLTS berdasarkan perancangan spesifikasi teknis, dikumpulkan data terkait biaya instalasi dan juga perawatan revitalisasi sistem yang terangkum di Tabel 2.

Tabel 2. Rincian Biaya CapEx dan OpEx

Capital Expenditure (Include PPN)				
No	Rincian	Jumlah	Biaya (Rp)	Harga Total (Rp)
1	Inverter Daya 10kW	1	38.500.000	38.500.000
2	Baterai Lithium 5kWh	4	18.000.000	72.000.000
3	Kabel	1	2.500.000	2.500.000
4	Panel	1	2.500.000	2.500.000
5	Instalasi	3	700.000	2.100.000
	Total			117.600.000
Operational Expenditure (Per Tahun)				
No	Rincian	Jumlah	Biaya (Rp)	Total (Rp)
1	Depresiasi Inverter	1	-	-
2	Depresiasi Baterai	2	-	-
3	Pegawai Perawatan	1	12.000.000	12.000.000
4	Pegawai Kebersihan	1	6.000.000	6.000.000
5	Penggantian Komponen	1	2.400.000	2.400.000
6	Overhead 5% Capex	1	2.400.000	2.400.000
	Total			22.800.000

Tabel 3. Parameter Analisis Keuangan

No	Deskripsi	Keterangan
1	Lama kontrak	10 Tahun
2	PPN	Include
3	Income Tax (pph)	0%
4	Harga Penjualan Listrik (Berdasarkan Perpres No. 112 Th. 2022) (1 USD = 16500 IDR)	Rp - (Tidak dikomersilkan)
5	Diskonto (BI Rate)	4.75%
6	Inflasi	2.65%

Data pada **Tabel 2** dan **Tabel 3** digunakan sebagai input utama dalam simulasi PVSyst untuk memperkirakan biaya produksi listrik (Rp/kWh) selama umur ekonomis perangkat PLTS yang diasumsikan 10 tahun. Input meliputi komponen biaya investasi awal (CAPEX), biaya operasi dan pemeliharaan tahunan (OPEX), produksi energi tahunan dari simulasi PVsyst, faktor degradasi modul, serta biaya penggantian/penyusutan komponen besar; semua komponen tersebut digabungkan dalam model ekonomi sehingga diperoleh nilai LCOE, arus kas tahunan, dan estimasi biaya listrik rata-rata per kWh selama periode 10 tahun.

Analisis Hasil Simulasi PVSyst

Analisis hasil simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak PVSyst untuk mengevaluasi kinerja teknis dan kelayakan ekonomi sistem PLTS yang direncanakan. Simulasi ini memanfaatkan data radiasi matahari, konfigurasi sistem, efisiensi komponen, serta kondisi lokasi untuk memperoleh hasil berupa produksi energi tahunan, *Performance Ratio* (PR), dan *Levelized Cost of Energy* (LCOE). Selain itu, PVSyst juga menghitung parameter finansial seperti *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), *Return on Investment* (ROI), dan *Payback Period*. Hasil analisis ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai efisiensi sistem dan potensi keuntungan ekonomi dari penerapan PLTS on-grid di lokasi studi. Hasil perencanaan dan analisis finansial untuk PLTS yang disimulasikan pada perangkat lunak PVSyst pada **Gambar 7**.

Sistem PLTS menunjukkan total CapEx sebesar Rp 117.600.000, dengan komponen terbesar berasal dari baterai lithium (Rp72.000.000). Sementara itu, OpEx tahunan sebesar Rp22.800.000, meningkat sesuai inflasi 2,65% per tahun. Biaya terbesar berasal dari pemeliharaan rutin dan pembersihan panel, yang penting untuk menjaga efisiensi produksi daya. Berdasarkan data energi terpakai sebesar 8.952 kWh/tahun, diperoleh LCOE sebesar Rp 4.242,48/kWh. Sebagai pembanding, tarif listrik PLN non subsidi untuk pelanggan bisnis dan industri kecil berada pada kisaran Rp1.600–Rp2.000 per kWh. Nilai ini menunjukkan bahwa biaya energi PLTS (LCOE Rp4.242,48/kWh) masih lebih tinggi dibanding tarif listrik PLN. Namun, investasi PLTS memiliki keuntungan jangka panjang berupa kemandirian energi, stabilitas pasokan, serta pengurangan emisi karbon.

Cost of the system			
Installation costs			
Item	Quantity units	Cost IDR	Total IDR
Batteries	4	18,000,000.00	72,000,000.00
Controllers			38,500,000.00
Other components			
Accessories, fasteners	1	2,500,000.00	2,500,000.00
Wiring	1	2,500,000.00	2,500,000.00
Installation			
Global installation cost per module	36	15,000.00	540,000.00
Global installation cost per inverter	1	360,000.00	360,000.00
Global installation cost per battery	4	300,000.00	1,200,000.00
		Total	117,600,000.00
		Depreciable asset	108,000,000.00
Operating costs			
Item			Total IDR/year
Maintenance			
Salaries			12,000,000.00
Repairs			2,400,000.00
Cleaning			6,000,000.00
Overhead			2,400,000.00
Total (OPEX)			22,800,000.00
Including inflation (2.65%)			31,764,302.86
System summary			
Total installation cost		117,600,000.00 IDR	
Operating costs (incl. inflation 2.65%/year)		31,764,302.86 IDR/year	
Excess energy (battery full)		6230 kWh/year	
Used solar energy		8952 kWh/year	
Used energy cost		4,242.4770 IDR/kWh	

Gambar 7. Hasil Analisis Biaya dengan PVSyst

Revitalisasi Penggantian Komponen

Pengadaan Barang Proses pengadaan dilakukan berdasarkan spesifikasi teknis yang telah dirancang pada tahap perencanaan. Komponen utama yang dibeli meliputi inverter hybrid Deye 10 kW tiga fasa, baterai lithium 51,2 V 100 Ah (2 unit) dan panel proteksi. Setiap komponen melalui proses verifikasi mutu melalui pengecekan fisik, sertifikat produk, dan kesesuaian dengan standar IEC. Proses pengiriman dan penerimaan barang langsung dilakukan di UG Technopark, Cianjur, Jawa Barat. Setiap komponen melalui proses verifikasi mutu melalui pengecekan fisik, kesesuaian dengan standar IEC dan juga spesifikasi teknis. Proses pengiriman dan penerimaan barang langsung dilakukan ke UG Technopark, Cianjur, Jawa Barat.

Instalasi Komponen Sistem

Proses instalasi komponen sistem PLTS di Zona Teknologi Pertanian UG Technopark dilaksanakan secara sistematis agar seluruh perangkat dapat bekerja sesuai rancangan teknis. Setiap tahap dilakukan dengan memperhatikan aspek keamanan, efisiensi, serta keterpaduan antara sumber energi surya, baterai, dan jaringan listrik PLN.

Mounting Inverter ke Rumah Kendali (Dome)

Inverter hybrid 10 kW tipe Deye SUN-10K-SG04LP3-EU dipasang di rumah kendali (dome) menggunakan sistem mounting di tengah Dome dengan tiang penyangga dan juga dengan sirkulasi udara yang memadai. **Gambar 8** kegiatan pemasangan inverter dilakukan pada posisi terlindung dari panas langsung dan kelembapan. Penempatan ini juga memudahkan akses untuk pemeliharaan dan pemantauan sistem secara rutin.

Instalasi Baterai dan Wiring ke Grid

Dua unit baterai lithium 51,2 V 100 Ah (LiFePO₄) dipasang di ruang kendali yang sama dan dihubungkan secara paralel. **Gambar 9** merupakan proses koneksi dilakukan menggunakan kabel tembaga berstandar DC tahan panas dan dilengkapi fuse serta MCB DC sebagai proteksi. Jalur keluaran baterai dihubungkan ke inverter dan selanjutnya ke jaringan grid PLN melalui *Automatic Transfer Switch (ATS)*

pada Inverter agar sistem dapat berpindah sumber daya otomatis antara PV, baterai dan PLN sesuai kondisi energi.



Gambar 8. Pemasangan Inverter Hybrid SCC



Gambar 9. Pemasangan Inverter dan Baterai

Rewiring Modul Panel

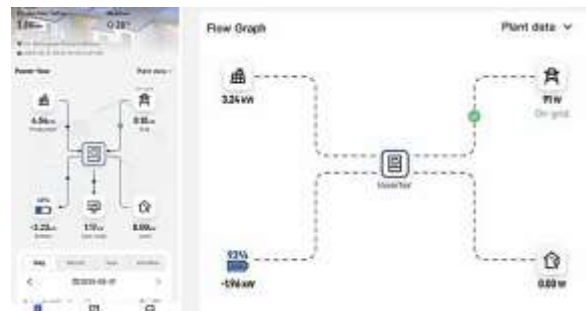
Sesuai Perencanaan Proses rewiring dilakukan untuk menyesuaikan konfigurasi seri-paralel modul dengan rancangan baru sistem dua MPPT. Array pertama terdiri atas 18 modul 300 Wp (18S1P) dan array kedua 36 modul 150 Wp (36S1P). Semua koneksi menggunakan kabel PV berinsulasi UV-resistant dengan konektor MC4, serta dilengkapi pelabelan jalur untuk mempermudah inspeksi dan pemeliharaan.

Pengujian dan Komisioning

Tahap pengujian dan komisioning dilakukan untuk memastikan seluruh komponen sistem PLTS berfungsi dengan baik setelah instalasi selesai. Proses ini meliputi pemeriksaan performa perangkat, verifikasi keamanan instalasi, serta pengujian operasional sistem ketika terhubung ke beban dan sumber listrik. Hasil pengujian menjadi dasar untuk menyatakan bahwa sistem PLTS siap dioperasikan secara penuh. Uji Fungsi Uji fungsi dilakukan untuk memastikan setiap komponen bekerja sesuai spesifikasi. Pemeriksaan mencakup tegangan keluaran panel surya, fungsi proteksi pada panel DC dan AC, respons inverter dalam mode PV, baterai, dan PLN, serta pengecekan status pengisian dan pelepasan energi baterai. Sistem monitoring diverifikasi untuk memastikan seluruh data produksi, konsumsi, dan status perangkat terbaca dengan akurat. **Gambar 10** menampilkan monitoring inverter yang menunjukkan data produksi listrik saat ini. Dua input PV aktif, yaitu PV1 menghasilkan 913 W dan PV2 menghasilkan 1,563 kW. Pada sisi AC, tegangan fasa berada di kisaran 218–225 V dengan frekuensi stabil 50 Hz. Sistem mencatat produksi harian sebesar 3,6 kWh dan total produksi kumulatif mencapai 26,3 kWh, dengan daya keluaran inverter saat ini sekitar 1,140 kVA.



Gambar 10. Hasil Pengukuran PV dan Luar Inverter

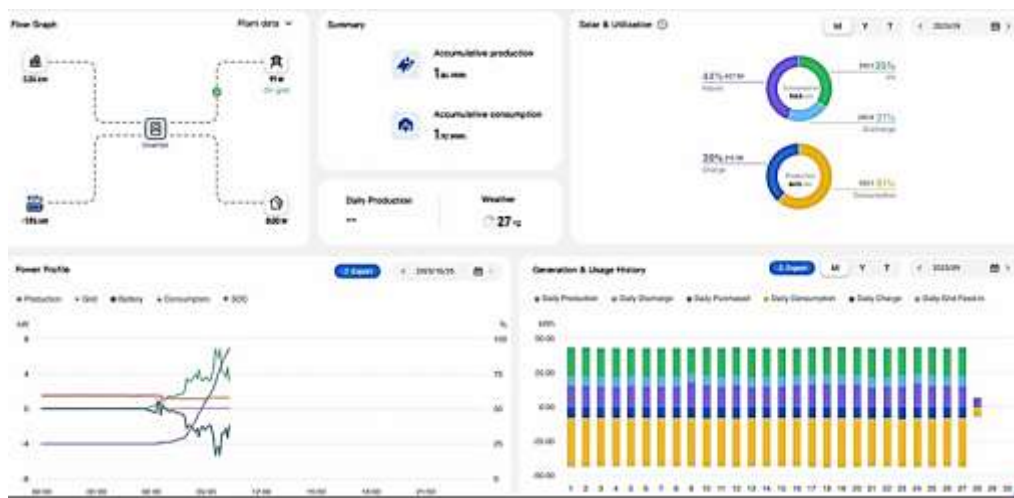


Gambar 11. Pengujian dengan Beban

Uji Beban dan Uji Hasil

Uji beban dilakukan dengan menghubungkan sistem PLTS ke beban aktual pada Zona Teknologi Pertanian. **Gambar 11** merupakan pengujian mencakup operasi beban ringan, menengah, hingga mendekati beban penuh. Pengukuran stabilitas tegangan dan arus dilakukan pada setiap fasa untuk memastikan suplai daya merata dan sistem mampu menangani dinamika perubahan beban tanpa gangguan.

Pengujian dengan beban uji hasil merupakan tahap akhir yang menilai performa keseluruhan sistem setelah uji fungsi dan uji beban dinyatakan berhasil. Pengukuran dilakukan pada efisiensi inverter, performa pengisian baterai, kontinuitas suplai, serta respon sistem terhadap pemadaman PLN. Laporan hasil pengujian kemudian disusun sebagai bukti bahwa sistem PLTS telah memenuhi standar operasional dan siap digunakan secara berkelanjutan. **Gambar 12** menunjukkan performa sistem PLTS UG Farming yang telah beroperasi selama satu bulan. Produksi energi akumulatif mencapai 1,04 MWh, sedangkan konsumsi total mencapai 1,92 MWh, yang berarti sistem masih memanfaatkan energi dari grid untuk menutupi kekurangan. Pemanfaatan energi menunjukkan bahwa 35% konsumsi berasal dari PV, 44% dari grid, dan 21% dari baterai. Pada sisi produksi, 61% energi PV digunakan langsung oleh beban, sementara 39% dialirkan untuk mengisi baterai. Grafik power profile memperlihatkan pola produksi harian, pengisian dan pelepasan baterai, serta konsumsi beban. Data ini menunjukkan bahwa sistem berjalan stabil, berhasil menyuplai energi dari tiga sumber (PV–Baterai–PLN), dan memberikan gambaran kinerja hybrid yang optimal selama bulan pertama operasi.



Gambar 12. Pengujian dengan beroperasi selama satu bulan

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis tekno-ekonomi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem PLTS 10,8 kWp di UG Technopark mengalami penurunan kinerja akibat degradasi komponen, yang ditunjukkan oleh rendahnya kontribusi energi surya dan tingginya ketergantungan terhadap jaringan PLN. Implementasi strategi repowering melalui penggantian komponen utama seperti inverter dan baterai serta penyesuaian konfigurasi sistem terbukti mampu meningkatkan performa operasional, ditandai dengan distribusi energi yang lebih optimal dan sistem yang lebih stabil dalam menyuplai beban. Dari sisi ekonomi, investasi repowering menunjukkan biaya energi (LCOE) yang masih relatif tinggi dibandingkan listrik PLN, namun tetap layak dipertimbangkan karena memberikan keuntungan non-finansial seperti peningkatan keandalan sistem, efisiensi operasional, serta kontribusi terhadap keberlanjutan energi dan pengurangan emisi. Dengan demikian, repowering menjadi solusi strategis untuk memperpanjang umur ekonomis dan meningkatkan kinerja sistem PLTS yang telah beroperasi, khususnya pada aplikasi sektor pertanian dan kawasan berbasis teknologi.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Universitas Gunadarma atas dukungan, fasilitas, serta kesempatan yang diberikan sehingga penelitian yang berjudul *“Analisis Tekno-Ekonomi Penggantian Komponen PLTS yang Mengalami Degradasi Menggunakan PVsyst (Studi Kasus UG Technopark)”* dapat diselesaikan dengan baik. Apresiasi juga disampaikan kepada seluruh pihak di lingkungan UG Technopark yang telah membantu dalam penyediaan data, pendampingan teknis, serta kontribusi selama proses penelitian ini berlangsung. Dukungan tersebut sangat berarti dalam menunjang keberhasilan penelitian ini.

6. Referensi

- [1] T. Adekunle, A. Azeez, M. O. Iroko, and L. Olatomiwa, “Techno-economic analysis of an optimized renewable energy integrated combined heat and power system for a primary healthcare facility,”

- 2026.
- [2] M. C. Navarro, "Energy technologies for hybrid renewable energy systems: a study of spatially viable sites for hybrid power plants in Spain," *Front. Energy Res.*, vol. 13, pp. 1–18, 2025, doi: 10.3389/fenrg.2025.1628824.
- [3] M. Y. Y. Hishikawa, "Current Status and Future Direction of Photovoltaics," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 17, p. 9416, 2025, doi: 10.3390/app15179416.
- [4] S. R. P. S. Ehsan Rezaee, "Solar Energy in 2025: Global Deployment, Cost Trends, and the Role of Energy Storage in Enabling a Resilient Smart Energy Infrastructure," *Energy Environ. Mater.*, vol. 9, no. 1, p. e12840, 2025, doi: 10.1002/eem2.70199.
- [5] N. E. Merve Yılmaz, Onur Akar, "Technological advancements in PV-based energy storage methods: A comprehensive review," *Int. J. Energy Stud.*, vol. 10, no. 2, pp. 619–646, 2024, doi: 10.58559/ijes.1625250.
- [6] S. P. Dharma Aryani, "Artificial Neural Network Prediction to Identify Solar Energy Potential in Eastern Indonesia," in *International Conference on Power Engineering and Applications (ICPEA)*, 2023, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICPEA56918.2023.10093155.
- [7] S. Siregar, "Role of Solar Photovoltaic Energy in GHG Emission Reduction within Indonesia's Long-Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience 2050," *Int. J. Energy Econ. Policy*, vol. 15, no. 2, pp. 421–428, 2025, doi: 10.32479/ijeep.18352.
- [8] S. Chanchangi, "Investigation of Degradation and Failure Mechanisms of Photovoltaic Modules in Different Climatic Conditions: A Review," *Energies*, vol. 17, no. 3, p. 721, 2024, doi: 10.3390/en17030721.
- [9] S. R. R. Kumar, "Reliability Analysis and Performance Degradation of Solar PV Systems: A Decade in Review," *Sol. Energy*, vol. 258, pp. 142–165, 2023, doi: 10.1016/j.solener.2023.04.052.
- [10] M. S. Chowdhury, "A Review of Photovoltaic Module Degradation Mechanisms and Diagnostic Methods," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 189, p. Part A, 113892, 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.113892.
- [11] N. G. K. S. Kumar, "Comprehensive Analysis of Solar PV Degradation Under Various Climatic Conditions," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 13, no. 4, pp. 562–575, 2023, doi: 10.1109/JPHOTOV.2023.3274510.
- [12] A. S. Al-Ezzi, "From Reactive to Predictive: Revolutionizing PV Maintenance Strategies for Aging Solar Farms," *Renew. Energy Focus*, vol. 48, p. 100521, 2024, doi: 10.1016/j.ref.2023.100521.
- [13] F. J. Muñoz-Rodríguez, "Repowering Aging Photovoltaic Plants: Technical Potential, Economic Viability, and Environmental Impact," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 195, p. 114322, 2024, doi: 10.1016/j.rser.2024.114322.
- [14] M. T. S. R. A. G. S. Kusuma, "Strategic Repowering of Solar PV Systems: Integration of Advanced Inverters and High-Efficiency Modules," *Sol. Energy*, vol. 281, p. 113560, 2025, doi: 10.1016/j.solener.2024.113560.
- [15] F. J. Muñoz-Rodríguez, "Techno-Economic Assessment of Full and Partial Repowering in Aging Solar PV Plants: Integrating High-Efficiency Modules and Advanced Storage," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 195, p. 114322, 2024, doi: 10.1016/j.rser.2024.114322.
- [16] J. Z. L. Wang, "Modernizing Legacy Photovoltaic Assets: The Synergy of Module Upgrading and Battery Retrofitting," *Appl. Energy*, vol. 362, p. 122910, 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.122910.
- [17] G. S. G. Sacco, "Techno-Economic Analysis of Repowering Strategies for Aging Photovoltaic Plants: A Case Study in Southern Europe," *Energies*, vol. 17, no. 5, 2024, doi: 10.3390/en17051124.
- [18] G. H. M. Dhimish, "Economic and Technical Impacts of Inverter and Module Repowering on Large-Scale PV Plants," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 14, no. 2, pp. 285–298, 2024, doi: 10.1109/JPHOTOV.2023.3338902.
- [19] G. H. M. Dhimish, "Data-Driven Performance Simulation for PV Repowering: Addressing Uncertainty in Long-Term Energy Yield," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 14, no. 3, 2024, doi: 10.1109/JPHOTOV.2024.3351201.
- [20] M. G. Villalva, "Design strategies for building rooftop photovoltaic systems: Efficiency and grid integration," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 55, p. 102838, 2023, doi: 10.1016/j.seta.2022.102838.
- [21] M. A. Islam, "Techno-economic assessment of utility-scale solar PV: A comparative analysis of crystalline silicon and thin-film technologies," *Sol. Energy*, vol. 220, pp. 553–566, 2021, doi:

-
- 10.1016/j.solener.2021.03.045.
- [22] M. S. Adaramola, "Operational performance assessment of a 5 kWp grid-connected photovoltaic system in Ghana," *Renew. Energy*, vol. 171, no. 1, pp. 132–145, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.02.079.
- [23] R. Korgaonkar, "Viability of performance improvement of degraded Photovoltaic plants through reconfiguration of PV modules," *Sol. Energy*, vol. 293, p. 113451, 2025, doi: 10.1016/j.solener.2025.113451.