



Analisis Penyebab Deviasi Performance Ratio Simulasi Terhadap Performance Ratio Aktual pada Sistem PLTS On-Grid

Kenza Ibnu Authar As-sauqy¹, Ahmad Bustomi^{1*}, Asep Yana Yusyama¹

¹Program Studi Teknologi Rekayasa Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

*Corresponding author E-mail address: ahmad.bustomi@mesin.pnj.ac.id

Abstrak

Kinerja aktual Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) On-grid di lapangan kerap menunjukkan deviasi terhadap proyeksi simulasi awal akibat berbagai faktor losses eksternal maupun internal yang bersifat dinamis. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung besar deviasi nilai Performance Ratio (PR) antara hasil simulasi dan pengukuran aktual, mengidentifikasi komponen losses teknis yang paling signifikan, serta menganalisis kesesuaian PR hasil pemodelan ulang terhadap data aktual. Penelitian menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan komparatif analitis pada sistem PLTS On-grid berkapasitas 491 kWp di Resort X, Nusa Dua, Bali. Data primer PR aktual, energi keluaran, dan iradiasi diperoleh dari platform FusionSolar selama 1–21 Mei, sedangkan data simulasi diperoleh dari pemodelan PVsyst. Hasil menunjukkan PVsyst memproyeksikan PR sebesar 78,70%, sementara PR aktual rata-rata 70,34%, menghasilkan deviasi absolut 8,36 poin persentase dan deviasi relatif 10,62%. Validasi lapangan mengungkap dua penyebab dominan, yaitu perbedaan sudut kemiringan panel aktual (10° – $41,7^{\circ}$) terhadap asumsi simulasi (10° – 43°), serta rugi-rugi kabel DC aktual sebesar 2,94% hampir tiga kali lipat asumsi simulasi (1,0%) akibat panjang kabel riil yang jauh lebih besar. Setelah re-simulasi dan koreksi referensi iradiasi dari Ginc menjadi GHI, PR proyeksi menjadi 70,44%, mendekati PR aktual. Hal ini membuktikan kombinasi faktor kemiringan panel, rugi-rugi kabel, dan perbedaan referensi iradiasi merupakan penyebab utama deviasi PR pada sistem PLTS yang diteliti.

Kata-kata kunci: Performance Ratio, PLTS On-grid, PVsyst, deviasi, losses, Sankey Diagram

Abstract

Actual field performance of grid-connected solar power plants (PLTS On-grid) often deviates from initial simulation projections due to dynamic external and internal loss factors. This study aims to calculate the PR deviation between simulation and actual measurement, identify the most significant technical loss components, and analyze the conformity between re-simulated PR and actual data. The research uses a quantitative method with a comparative-analytical approach on a 491 kWp grid-connected solar plant at Resort X, Nusa Dua, Bali. Primary data on actual PR, output energy, and irradiance were obtained from the FusionSolar platform over 1–21 May, while simulation data were obtained from PVsyst modeling. Results show PVsyst projected a PR of 78.70%, while the actual average PR was 70.34%, yielding an absolute deviation of 8.36 percentage points and a relative deviation of 10.62%. Field validation revealed two dominant causes: the discrepancy between actual panel tilt angle (10° – 41.7°) and the simulation assumption (10° – 43°), and actual DC cable losses of 2.94%—nearly three times the simulation assumption (1.0%)—due to a much greater real cable length. After re-simulation with as-built parameters and correcting the irradiance reference from Ginc to GHI, the projected PR became 70.44%, closely matching the actual PR. This confirms that tilt angle, cable losses, and irradiance reference differences are the main causes of PR deviation in the studied system.

Keywords: Performance Ratio, grid-connected solar PV, PVsyst, deviation, losses, Sankey Diagram

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi radiasi matahari sebagai sumber energi alternatif terus mengalami percepatan, sejalan dengan karakteristik geografis Indonesia yang beriklim tropis dengan potensi paparan irradiance tinggi sepanjang tahun. Energi surya merupakan sumber energi yang sangat ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca ataupun polusi udara lainnya. Dengan pemanfaatan energi surya, kita bisa mengurangi dampak buruk terhadap lingkungan dari emisi karbon, selain itu energi surya ini juga merupakan sumber energi yang tak terbatas dan dapat diperbarui [1]. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sistem On-grid menjadi salah satu implementasi teknologi yang paling masif dikembangkan dalam skala industri maupun komersial [2]. Keandalan operasi sistem PLTS On-grid sangat bergantung pada tingkat efisiensi konversi modul fotovoltaik dan integrasi komponen kelistrikan pendukung lainnya [3].

Dalam fase awal perancangan, instalasi PLTS memiliki target proyeksi daya keluaran yang ditentukan melalui pemodelan simulasi prediktif. Perangkat lunak PVsyst menjadi standar industri dalam melakukan kalkulasi potensi produksi energi dengan mempertimbangkan letak geografis, tata letak modul, serta berbagai parameter rugi-rugi sistem [4]. Parameter utama yang digunakan untuk mempresentasikan *overall* ketersediaan energi dari instalasi fotovoltaik adalah Performance Ratio (PR), yang secara matematis mengukur performa teknis PLTS dengan memperhatikan beberapa factor penentu seperti Irradiasi matahari, besaran PV yang digunakan, hingga sistematika besaran inverter dan kabel yang digunakan [5].

Namun dalam implementasi yang terjadi di lapangan, capaian energi harian sistem PLTS kerap menunjukkan deviasi terhadap parameter desain simulasi awal [6]. Penurunan kinerja aktual diakibatkan oleh fenomena losses atau kerugian yang sifatnya dinamis, meliputi faktor eksternal (lingkungan) maupun internal (komponen) [7]. Anomali iradiasi, peningkatan temperatur operasi sel surya, akumulasi debu pada permukaan panel (soiling losses)[1], serta rugi-rugi teknis seperti degradasi konversi inverter dan kerugian kabel ohmik menjadi faktor pendegradasi efisiensi yang krusial [8].

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji kinerja PLTS On-grid menggunakan PVsyst maupun perbandingannya terhadap data lapangan. Mansur [4] menganalisis kinerja PLTS On-grid 50 kWp akibat efek bayangan menggunakan PVsyst namun belum menelusuri secara rinci penyebab teknis deviasi PR terhadap data aktual pasca-instalasi. Irawan et al. [5] mengevaluasi kinerja PLTS On-grid 600 kWp pada jaringan distribusi Gili Trawangan dengan fokus pada aspek distribusi daya, tanpa membahas rekonsiliasi antara parameter simulasi dan kondisi as-built seperti kemiringan panel maupun rugi-rugi kabel riil. Sementara itu, studi pengaruh suhu terhadap daya keluaran modul fotovoltaik oleh [6] menyoroti losses termal namun tidak mengaitkannya dengan perbedaan referensi iradiasi antara simulasi dan pengukuran aktual. Dengan demikian, terdapat gap penelitian berupa minimnya kajian yang secara sistematis menelusuri sumber deviasi PR simulasi-aktual hingga ke level parameter kemiringan & losses kabel sekaligus basis referensi iradiasi, kemudian memvalidasinya melalui re-simulasi. Penelitian ini berupaya mengisi gap tersebut.

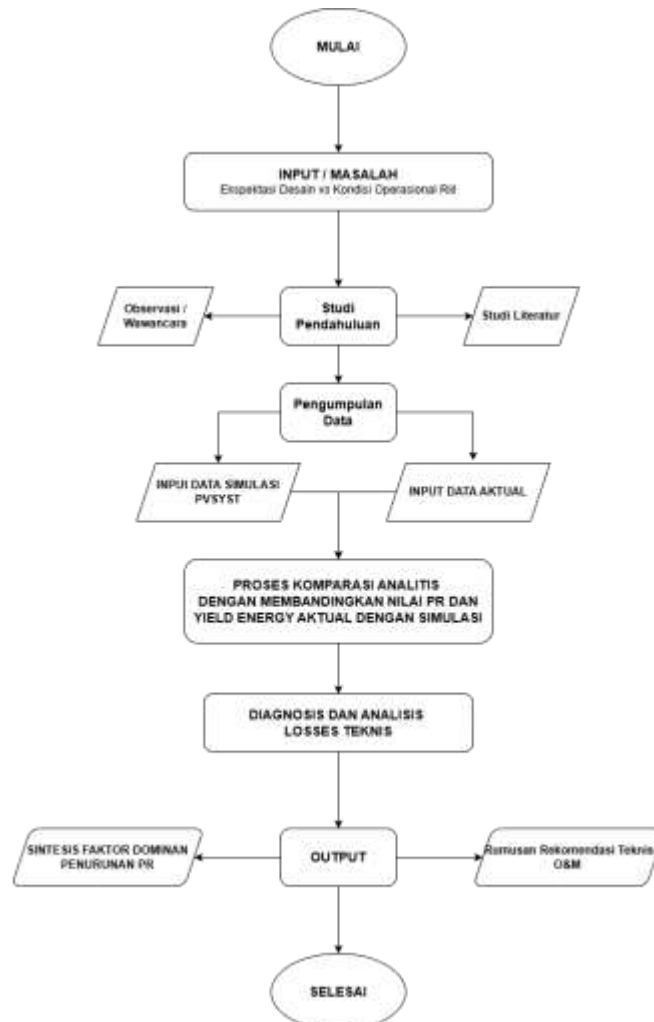
Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, melihat sejauh mana perbedaan kinerja antara hasil simulasi desain dan kenyataan di lapangan sangatlah penting untuk menilai keandalan sebuah PLTS yang akan digunakan dalam sebuah tempat industri. Kita perlu mengukur nilai Performance Ratio (PR) yang sebenarnya dan mencari tahu sumber kerugian daya (losses) terbesar agar kondisi teknis kelistrikan sistem dapat divalidasi dengan baik. Berangkat dari kebutuhan tersebut, penulis tertarik untuk melakukan penelitian mendalam dengan judul "Analisis Penyebab Deviasi Performance Ratio Aktual Pada PLTS On-Grid".

Secara eksplisit, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menghitung besar deviasi absolut dan relatif Performance Ratio (PR) antara hasil simulasi PVsyst dan pengukuran aktual pada sistem PLTS On-grid 491 kWp di Resort X, Nusa Dua, Bali; (2) mengidentifikasi dan memvalidasi komponen losses teknis yang paling signifikan menyebabkan deviasi tersebut; serta (3) menganalisis kesesuaian PR hasil re-simulasi terhadap data PR aktual sebagai bentuk validasi penyebab deviasi yang telah diidentifikasi.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan komparatif analitis. Metode penelitian kuantitatif adalah metode yang berlandaskan pada filsafat positivisme, digunakan untuk meneliti pada populasi atau sampel tertentu, di mana pengumpulan data menggunakan instrumen pengukuran dan analisis dengan tujuan untuk menguji teori yang telah ditetapkan [9]. Sejalan dengan hal tersebut, Creswell & Creswell (2023) mendefinisikan pendekatan kuantitatif sebagai metode yang sangat relevan untuk menguji teori-teori objektif melalui pengukuran variabel berwujud angka [10]. Sementara itu, pendekatan komparatif diterapkan untuk menyandingkan dan mencari persentase deviasi antara nilai Performance Ratio (PR) serta rincian losses kelistrikan hasil pemodelan komputasi dengan data yang diperoleh dari lapangan [11]. Dalam konteks penelitian ini, pendekatan kuantitatif diterapkan karena keseluruhan tahapan evaluasi bergantung mutlak pada pengumpulan dan pengolahan data matematis yang terukur secara instrumen, seperti nilai Global Horizontal

Irradiation (GHI), kapasitas daya terpasang, jumlah energi listrik yang disalurkan, serta kalkulasi Performance Ratio (PR). Objek penelitian ini meliputi sistem PLTS On-grid berkapasitas 491 kWp yang terpasang di Resort X, Nusa Dua, Bali (koordinat -8.795804° , 115.22992°). Sistem ini menggunakan 892 unit panel surya dengan merk Trina Solar Vertex dengan seri TSM-550W-DE19 jenis Kristal Monocrystalline, 8 unit inverter Huawei seri SUN2000-50KTL-M3, dan 1 unit inverter Huawei seri SUN2000-15KTL-M5 dengan total kapasitas 491 kWp.



Gambar 1. Diagram Alir

Analisa data dilakukan melalui tiga metode: (1) Observasi—pengambilan data historis dari platform monitoring FusionSolar selama 1–21 Mei 2026 yang mencakup PR aktual, total energi (kWh), dan iradiasi (kWh/m^2); (2) Studi Literatur kajian jurnal ilmiah dan datasheet spesifikasi komponen; (3) Eksperimen dan Simulasi pemodelan PVsyst untuk baseline simulasi dan re-simulasi with as-built parameters.

Secara teknis, deviasi PR dihitung dengan dua pendekatan. Deviasi absolut diperoleh dari selisih langsung antara PR hasil simulasi PVsyst (PR_{Simulasi}) dan PR aktual hasil pembacaan FusionSolar (PR_{Aktual}), dengan persamaan $\Delta PR = PR_{\text{Simulasi}} - PR_{\text{Aktual}}$. Deviasi relatif dihitung dengan membagi deviasi absolut tersebut terhadap nilai PR simulasi sebagai basis (target awal), dinyatakan dalam persentase: $\text{Deviasi Relatif} = (\Delta PR / PR_{\text{Simulasi}}) \times 100\%$. Komparasi hasil simulasi terhadap data aktual dilakukan secara head-to-head pada periode observasi yang sama (1–21 Mei 2026), kemudian ditelusuri melalui Sankey Diagram losses PVsyst untuk mengidentifikasi kontributor losses dominan. Komponen losses yang teridentifikasi tersebut selanjutnya divalidasi terhadap kondisi lapangan (Commissioning Report dan pengukuran langsung), dan hasil validasi digunakan sebagai dasar koreksi parameter pada tahap re-simulasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Komponen Teknis PLTS Terpasang

Tabel 1. Komponen PLTS Terpasang

Komponen	Tipe	Unit (Kapasitas)
PV Module	Trina Solar VertexTSM-550W-DE19	892 unit (491 kWp)
Inverter 1	Huawei SUN2000-50KTL-M3	8 unit × 50 kW
Inverter 2	Huawei SUN2000-15KTL-M5	1 unit × 15 kW

Pada site ini menggunakan PV module Trina Solar 550 Wp dengan jenis *Monocrystalline* karena merupakan jenis yang paling sering digunakan dipasaran, karena memiliki keandalan yang lebih baik untuk jangka panjang. Meskipun mahal, namun jenis ini memiliki efisiensi tertinggi dari segi daya maupun area pemasangannya, tingkat efisiensi dari *monocrystalline* mencapai 21,02% [12].

3.2 Performance Ratio Aktual vs. Simulasi

Pemantauan kinerja PLTS dilakukan selama 21 hari operasional (1–21 Mei 2026).

Tabel 2. Data Logger Kinerja PLTS 1-21 Mei 2026

Statistical Period	Total String Capacity (kWp)	Global Irradiation (kWh/m ²)	PV Yield (kWh)	Performance Ratio (%)	Inverter Yield (kWh)	Total Yield (kWh)	Specific Energy (kWh/kWp)	Peak Power (kW)
1/5/26	490.60	5.85	1,993.94	69.51%	1,993.94	101,029.70	5.24	295.37
2/5/26	490.60	5.77	1,850.68	65.34%	1,850.68	102,880.38	4.86	286.37
3/5/26	490.60	4.66	1,564.72	68.50%	1,564.72	104,445.10	4.11	300.08
4/5/26	490.60	5.18	1,723.84	67.89%	1,723.84	106,168.94	4.53	291.54
5/5/26	490.60	5.91	1,653.89	57.03%	1,653.89	107,822.83	4.35	303.38
6/5/26	490.60	4.78	1,644.78	70.20%	1,644.78	109,467.61	4.32	301.34
7/5/26	490.60	4.37	1,542.81	72.04%	1,542.81	111,010.42	4.05	344.37
8/5/26	490.60	3.55	1,244.35	71.47%	1,244.35	112,254.77	3.27	320.13
9/5/26	490.60	4.12	1,470.50	72.82%	1,470.50	113,725.27	3.86	345.29
10/5/26	490.60	4.75	1,671.84	71.79%	1,671.84	115,397.11	4.39	333.95
11/5/26	490.60	4.34	1,518.01	71.31%	1,518.01	116,915.12	3.99	316.18
12/5/26	490.60	5.28	1,789.65	69.04%	1,789.65	118,704.77	4.70	305.70
13/5/26	490.60	4.94	1,644.92	67.94%	1,644.92	120,349.69	4.32	329.07
14/5/26	490.60	3.93	1,379.11	71.60%	1,379.11	121,728.80	3.62	315.16
15/5/26	490.60	5.30	1,773.85	68.28%	1,773.85	123,502.65	4.66	298.00
16/5/26	490.60	5.78	2,029.09	71.59%	2,029.09	125,531.74	5.33	307.65
17/5/26	490.60	4.75	1,724.02	73.92%	1,724.02	127,255.76	4.53	313.36
18/5/26	490.60	4.99	1,787.85	72.97%	1,787.85	129,043.61	4.70	344.10
19/5/26	490.60	5.50	1,952.97	72.43%	1,952.97	130,996.58	5.13	325.65
20/5/26	490.60	5.25	1,892.52	73.48%	1,892.52	132,889.10	4.97	367.52
21/5/26	490.60	3.90	1,491.22	77.92%	1,491.22	134,380.32	3.92	337.38
Average				70.34%				

Intensitas matahari harian (global irradiation) fluktuatif 3,55 kWh/m² hingga 5,91 kWh/m². Produksi energi tertinggi ada pada tanggal 16 Mei dengan nilai 2.029,09 kWh, sedangkan produksi terendah tercatat pada

8 Mei sebesar 1.244,35 kWh. Rata-rata PR aktual selama periode pemantauan adalah 70,34%, dengan nilai harian fluktuatif antara 57,03% hingga 77,92%. Berdasarkan simulasi PVsyst, sistem ini diproyeksikan memiliki rata-rata PR tahunan sebesar 78,70% pada bulan Mei, dengan target produksi E_Grid sebesar 707,77 MWh/tahun. Perbandingan langsung kedua nilai ini disajikan pada Tabel 2.

Tabel 3. Perbandingan PR Simulasi dan Aktual

Keterangan	Performance Ratio (%)
Simulasi Awal PVsyst	78,70%
Instalasi	70,34%

Dapat dilihat pada tabel 2 bahwa PR pada instalasi adalah 70,34%, hal ini menunjukkan bahwa PR tidak dalam kondisi ideal. Karena nilai PR ideal berkisar antara 75% hingga 90%, tergantung pada kualitas instalasi, lokasi geografis, jenis panel, dan kondisi operasional. Nilai PR yang rendah bisa menjadi indikator adanya masalah teknis dalam sistem, seperti degradasi modul, kesalahan orientasi panel, atau kerugian daya di inverter [13]. Temuan PR aktual sebesar 70,34% pada penelitian ini sejalan dengan pola yang dilaporkan Mansur [4], yang juga menemukan penurunan PR aktual PLTS On-grid 50 kWp akibat efek bayangan yang tidak sepenuhnya terakomodasi dalam simulasi awal. Namun berbeda dengan Irawan et al. [5] yang melaporkan PR PLTS On-grid 600 kWp di Gili Trawangan relatif mendekati target simulasi karena kondisi lapangan yang lebih sesuai asumsi desain, penelitian ini menunjukkan deviasi yang lebih besar (10,62%) akibat kombinasi perbedaan kemiringan panel dan rugi-rugi kabel DC yang jauh melampaui asumsi PVsyst. Perbandingan ini menegaskan bahwa besar-kecilnya deviasi PR sangat bergantung pada tingkat kesesuaian parameter as-built terhadap parameter simulasi pada masing-masing site, bukan semata pada kapasitas maupun lokasi geografis sistem

3.3 Analisis Deviasi

Deviasi adalah cara kita membandingkan antara ekspektasi (hasil perencanaan/simulasi) dengan realita (kinerja asli di lapangan) dari sebuah sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Tujuannya adalah untuk melihat seberapa besar selisih atau penyimpangan kinerja PLTS tersebut [14]. Evaluasi deviasi dilakukan dengan membandingkan PR simulasi (78,70%) terhadap PR aktual (70,34%). Deviasi absolut dihitung sebagai:

$$\Delta PR = PR_{\text{Simulasi}} - PR_{\text{Aktual}} = 78,70\% - 70,34\% = 8,36 \text{ poin persentase}$$

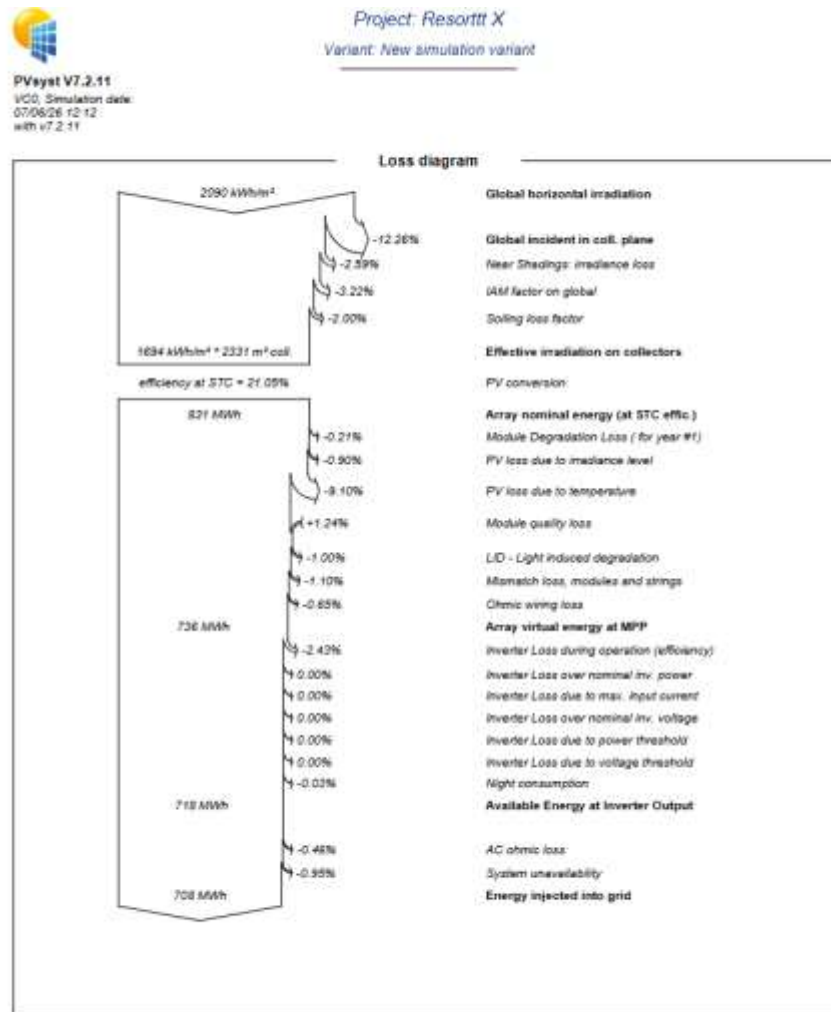
Deviasi relatif menunjukkan seberapa besar selisih tersebut dibandingkan target awal:

$$\text{Deviasi Relatif} = \left(\frac{8,36}{78,70} \right) \times 100\% = 10,62\%$$

Deviasi relatif sebesar 10,62% menunjukkan bahwa kinerja aktual sistem berada jauh di bawah target yang diproyeksikan pada tahap perencanaan.

3.4 Analisis Losses Berdasarkan Sankey Diagram

Setelah mengidentifikasi besaran deviasi *Performance Ratio* (PR) antara hasil simulasi dan data aktual, tahap selanjutnya adalah menelusuri akar penyebab terjadinya perbedaan tersebut. Penurunan performa pada sistem PLTS sejatinya tidak terlepas dari berbagai faktor reduksi di sepanjang aliran energi, mulai dari iradiasi matahari yang diterima oleh panel hingga daya akhir yang berhasil disalurkan. Oleh karena itu, guna menindaklanjuti temuan deviasi dan memetakan letak serta besaran penyusutan energi secara spesifik, subbab ini akan menguraikan analisis rugi-rugi (*losses*) secara menyeluruh menggunakan representasi visual dari *Sankey Diagram*. Secara sederhana, Sankey Diagram adalah diagram alir visual di mana lebar panah atau jalurnya berbanding lurus dengan jumlah aliran energi yang diwakilinya. Semakin tebal jalurnya, semakin besar energi yang mengalir. Sebaliknya, jika jalurnya menyempit atau bercabang keluar, berarti ada energi yang menyusut atau terbuang di titik tersebut. Dalam simulasi PVsyst untuk PLTS, diagram ini dipakai untuk menggambarkan "perjalanan" energi matahari dari bentuk iradiasi murni hingga dikonversi menjadi listrik AC yang siap disalurkan ke beban atau jaringan (grid). Dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Sankey Diagram

Bedasarkan Loss Diagram PVsyst, aliran energi diawali dari Global Horizontal Irradiation (GHI) sebesar 2.090 kWh/m². Kerugian terbesar terjadi saat penyesuaian arah datang cahaya dengan kemiringan panel (Global incident in collector plane) yang memotong potensi energi sebesar -12,26%. Kerugian lain yang teridentifikasi adalah sebagai berikut ;

Near shading (-3,81%), IAM factor (-3,20%), Soiling (-2,00%), PV loss due to temperature (-9,10%), LID (-1,00%), mismatch loss (-1,10%), ohmic wiring loss DC (-0,65%), inverter loss (-2,43%), ohmic wiring loss AC (-0,46%), dan unavailability sistem (-0,95%).

Dua faktor dominan yang paling berkontribusi terhadap penurunan energi adalah: (1) perbedaan kemiringan panel terhadap GHI (-12,26%) dan (2) rugi-rugi termal akibat suhu operasional tinggi (-9,10%). Kedua faktor ini menjadi titik kritis utama yang memengaruhi penurunan PR sistem secara keseluruhan.

3.5 IDENTIFIKASI PENYEBAB DEVIASI

3.5.1 Perbedaan Sudut Kemiringan (Tilt)

Pada kondisi aktual, PV module terpasang pada variasi kemiringan 10°–41,7° dengan beragam orientasi azimuth. Namun pada simulasi awal, sistem dimodelkan dengan kemiringan 27°, 40°, 43°, 43°, 28°, 30°, dan 10°. Perbedaan ini terkonfirmasi dari Commissioning Report lapangan vs. konfigurasi PVsyst.

Pre-Test and Commissioning Report

PV Module

PV Module Specification	
Device and Configuration Description	Description
Brand/Manufacturer	TIGRA Solar
Model/Type	TSM-55066-2610
Capacity	491,880 Wp
Number of Module	892 units
Number of String	34
Number of Module in Series	12, 16, 19, 23, 26, 28 Series
Tilt	10 / -17° / 34.5 / 97° / 34.5 / -83° / 34.5 / 7° / 34.2 / -17° / 27 / 7° / 29.6 / -83° / 30 / 97° / 41.2 / 7° / 30.3 / -17° / 10 / -17°
Installation Check	
Whether PV module installation following installation guide [1]	Check
Whether PV module installation does not cause damage to existing building infrastructure	Check
Whether PV module was installed properly [1]	Check
Whether installation clamping rack are installed on right zone PV	Check

Gambar 3. Pre-Test & Commissioning Report

System summary		
Grid-Connected System	Ground system (tables) on a hill	
Simulation for year no. 1		
PV Field Orientation	Near Shadings	User's nr
Fixed planes	Linear shadings	(Unrelated)
Tilt/azimuth		
	27 / 90 °	
	43 / -150 °	
	43 / 0 °	
	43 / 90 °	
	43 / 90 °	
	28 / -90 °	
	30 / 0 °	
	10 / 94 °	
System information		
PV Array		
No. of modules	892 units	Inverters
Power total	491 kWp	No. of units
		Power total
		Power ratio

Gambar 4. Simulasi Awal

Setelah diketahui perbedaan kemiringan antara simulasi dan implementasi nya selanjutnya dilakukan eksperimen variasi kemiringan tunggal untuk mengetahui dampak dari perbedaan kemiringan.

Tabel 4. Pengaruh Kemiringan Terhadap Irradiance

No	Kemiringan	Simulasi	Aktual	Deviasi (%)
1	10	726	772	6.34%
2	27	473	501	5.92%
3	29	342	360	5.26%
4	30	266	287	7.89%
5	35	242	254	4.96%
6	41	126	134	6.35%

bisa melihat dengan jelas bagaimana perubahan sudut kemiringan sangat memengaruhi intensitas radiasi matahari (irradiance) yang diterima. Polanya terlihat sangat konsisten, di mana semakin besar sudut kemiringannya, nilai irradiance yang dihasilkan justru semakin merosot. Perbedaan kemiringan kemiringan ini berkaitan dengan tingkat radiasi yang diterima oleh panel, irradiance sangat penting untuk diperhatikan, karna jumlah energy listrik yang dapat dikonversikan oleh photovoltaic bergantung dengan seberapa besarnya irradiance yang diterima oleh PV [15]. Pada perancangan PLTS umumnya dilengkapi dengan sensor *irradiance* yang berfungsi untuk *merecord* data *irradiance* yang ditangkap. Cara kerja nya adalah sensor irradiance menangkap radiasi yang jatuh kemudian sensor mengirim data menuju smart logger yang kemudian di konversi ke web monitoring [15].

3.5.2 Rugi-Rugi Kabel DC (Cable Losses)

PVsyst mengasumsikan kerugian kabel DC hanya sebesar 1,0% (setara panjang $\pm 61,5$ m). Namun kondisi aktual di lapangan jauh lebih kompleks; penarikan kabel harus bermanuver mengikuti cable tray, menghindari rintangan arsitektur, sehingga jalur kabel DC terpanjang membentang hingga 181,33 m (total 362,6 m untuk jalur positif-negatif).

Perhitungan ulang voltage drop menggunakan kabel 4 mm² pada panjang 362,6 m menghasilkan rugi-rugi tegangan aktual sebesar 2,94%, dengan daya terbuang mencapai 551,74 Watt. Nilai ini sebesar tiga kali lipat dari asumsi simulasi (1,0%), sebagaimana disajikan pada Tabel 3.

Tabel 5. Perbandingan Cable Losses Simulasi vs. Aktual

Parameter	Simulasi (PVsyst)	Aktual Implementasi
Panjang Kabel DC (m)	$\pm 61,5 \times 2 = 123$ m	$181,33 \times 2 = 362,6$ m
Ukuran Kabel	4 mm ²	4 mm ²
Voltage Drop (%)	1,0%	2,94%
Daya Hilang (W)	$\sim 187,8$ W	551,74 W

Fenomena ini menunjukkan bahwa setiap konduktor memiliki resistansi bawaan yang secara alamiah memicu terdistribusinya sebagian energi laten menjadi panas. penyusutan energi di sepanjang lintasan kabel inilah yang diklasifikasikan secara teknis sebagai rugi-rugi daya atau ohmic losses.[16]

3.6 VALIDASI MELALUI RE-SIMULASI

Untuk memvalidasi temuan lapangan, dilakukan re-simulasi pada PVsyst menggunakan parameter as-built yang telah dikoreksi. Simulasi dipecah menjadi dua klaster : klaster Inverter 1-5 (260 kWp, 5 orientasi) dan klaster Inverter 6-9 (231 kWp, 6 orientasi). Pemisahan ini dilakukan agar PVsyst dapat mengalkulasi secara presisi kerugian spesifik pada tingkat sub-array.

Hasil re-simulasi menunjukkan klaster Inverter 1-5 mencapai PR sebesar 77,2%, sedangkan klaster Inverter 6-9 mencapai PR sebesar 76,9%. Rata-rata PR re-simulasi adalah

$$(77,2 + 76,9) / 2 = 77,05\%.$$

Dibandingkan simulasi awal (78,70%), re-simulasi berhasil mengoreksi PR sekitar 1,65 poin persentase, namun selisih dengan PR aktual (70,34%) masih cukup besar.

Selisih yang masih tersisa ini disebabkan oleh perbedaan referensi iradiasi: berdasarkan manualbook pada software PVsyst diketahui bahwa Pvsyst menghitung PR menggunakan *Global Incident in Collector Plane* (Ginc)



Gambar 5 Rumus PR Simulasi

sementara sensor aktual di lapangan dipasang secara horizontal mengikuti standar IEC 61724-1[17], sehingga pembacaan hanya diperoleh dari Global Horizontal Irradiation (GHI). Untuk menyamakan basis perbandingan, dilakukan perhitungan ulang PR simulasi menggunakan referensi GHI (2.090,1 kWh/m²):

$$PR \text{ (Inv. 1-5)} = 374.784 / (2.090,1 \times 259,6) \times 100\% = 69,07\%$$

$$PR \text{ (Inv. 6-9)} = 346.679 / (2.090,1 \times 231) \times 100\% = 71,80\%$$

$$PR \text{ Total} = (69,07 + 71,80) / 2 = 70,44\%$$

PR re-simulasi dengan basis GHI sebesar 70,44% mendekati PR aktual sebesar 70,34% dengan selisih hanya 0,10 poin persentase. Hasil ini membuktikan bahwa kombinasi faktor kemiringan panel, rugi-rugi kabel DC, dan perbedaan metode referensi iradiasi merupakan penyebab utama deviasi PR pada sistem PLTS yang dianalisis. Hasil ini memperkuat temuan Tadiran & Piao [14] pada sistem rooftop PV 2,72 kWp di Tarlac City, Filipina, yang juga menegaskan bahwa penyelarasan basis referensi iradiasi antara simulasi dan pengukuran aktual merupakan langkah krusial sebelum menyimpulkan penyebab deviasi kinerja PLTS, karena perbedaan basis referensi (Ginc vs. GHI) dapat menimbulkan kesan deviasi yang lebih besar dari kondisi sebenarnya jika tidak dikoreksi.

4. KESIMPULAN

Dari hasil analisis peneliti, dapat disimpulkan bahwa ;

1. Target pencapaian tujuan pertama telah terpenuhi dengan teridentifikasinya deviasi teknis yang cukup signifikan. Diperoleh deviasi absolut sebesar 8,36% dan deviasi relatif sebesar 10,62%,. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja aktual sistem berada cukup jauh di bawah target yang diproyeksikan pada tahap perencanaan.
2. Tujuan kedua berhasil dicapai dengan mengidentifikasi bahwa perbedaan nilai PR ini sebagian besar bukan disebabkan oleh kegagalan alat, melainkan ketidaksesuaian input parameter lapangan terhadap asumsi desain. Secara kuantitatif, penyebab dominan bertumpu pada rugi-rugi kabel DC aktual yang menyentuh angka 2,94%, yang mana jauh lebih besar dari simulasinya. akibat panjang tarikan riil yang lebih jauh, serta anomali variasi sudut kemiringan panel aktual (10° – $41,7^{\circ}$).
3. Tujuan ketiga telah terbukti melalui proses kalibrasi re-simulasi. Penyesuaian parameter simulasi terhadap kondisi aktual (as-built) di lapangan beserta penyamaan metode referensi pembacaan sensor iradiasi, berhasil menekan nilai proyeksi PR simulasi hingga sejajar dan sangat mendekati nilai PR aktual. Hal ini membuktikan bahwa kombinasi dari faktor kemiringan panel, lonjakan rugi-rugi kabel, dan perbedaan metode referensi iradiasi merupakan penyebab utama terjadinya deviasi kinerja pada sistem PLTS ini.

Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam menyelaraskan perbedaan antara estimasi desain teoritis dan kinerja nyata PLTS di lapangan. Pendekatan yang digunakan untuk mengidentifikasi rugi-rugi energi beserta koreksi parameter simulasinya tidak hanya relevan untuk menyelesaikan kendala pada objek studi ini. Lebih dari itu, metode tersebut dapat diadaptasi sebagai kerangka evaluasi pada proyek PLTS lainnya guna menekan risiko ketidakpastian performa, sehingga akurasi perencanaan awal dapat lebih merepresentasikan kondisi aktual.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Ahmad Bustomi, M.Tr.T dan Bapak Asep Yana, S.Pd., M.Pd selaku pembimbing. Apresiasi dan rasa terima kasih juga ditujukan kepada PT. Atap Surya Nusantara Bali, atas izin penelitian, penyediaan data operasional *FusionSolar*, serta dukungan teknis selama proses observasi lapangan. Penulis juga berterimakasih kepada seluruh pihak yang telah berkontribusi dalam penulisan ini.

REFERENSI

- [1] V. Dwisari, S. Sudarti, and Y. Yushardi, "Pemanfaatan Energi Matahari: Masa Depan Energi Terbarukan," *Opt. J. Pendidik. Fis.*, vol. 7, no. 2, pp. 376–384, 2023.
- [2] P. Inverters and T. M. Techniques, "and Control Strategies," 2020.
- [3] P. P. A. Santoso, F. Nopriandy, I. F. B. Ningsih, L. D. Anjiu, and I. Kurniawan, "Pengaruh Bentuk Rangkaian Panel Surya Terhadap Kuat Arus, Tegangan dan Daya," *J. Engine Energi, Manufaktur, dan Mater.*, vol. 6, no. 1, p. 26, 2022.
- [4] A. Mansur, "ANALISA KINERJA PLTS ON GRID 50 KWP AKIBAT EFEK BAYANGAN MENGGUNAKAN SOFTWARE PVSYS," no. 1, pp. 28–33, 2021.
- [5] R. Irawan, F. D. Wijaya, and A. I. Cahyadi, "Evaluasi Kinerja PLTS On-Grid 600 kWp pada Jaringan Distribusi Gili Trawangan," vol. 13, pp. 116–123, 2024.
- [6] P. Reflektor and D. I. Samarinda, "Pengaruh suhu pada daya keluaran modul fotovoltaik dengan penambahan reflektor di samarinda," vol. 5, no. 1, 2020.
- [7] Y. I. Lukmanto *et al.*, "Agustus 2022, Hal. 37-44 Yogik Indra Lukmanto dkk / Analisis Losses Daya Sel Surya Dalam Fabrikasi Modul Surya...", vol. 1, no. 1, pp. 37–44, 2022.
- [8] H. Mukhtar, "Metode Evaluasi Performa Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Indoensia," *Metod. Eval. Performa Sist. Pembangkit List. Tenaga Surya di Indoensia*, vol. 8, no. 1, pp. 280–289, 2025.
- [9] *DAN R & D. .*
- [10] *No Title. .*
- [11] A. Octavia and L. Handayani, "Studi Diagnostik : Transformasi Tata Kelola Penelitian di Universitas Jambi (Komparasi Tata Kelola LPPM UNJA dan Beberapa Perguruan Tinggi di Indonesia)."
- [12] U. I. Ar-raniry, K. Darussalam, and B. Aceh, "ANALISIS PERBANDINGAN EFESIENSI PANEL SURYA," vol. 13, no. 3, pp. 431–439.
- [13] N. Sartika, A. Nur, and R. Fajri, "PERANCANGAN DAN SIMULASI SISTEM PEMBANGKIT

- LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) ATAP PADA MASJID JAMI ' AL-MUHAJIRIN BEKASI," no. 1, pp. 1–9, 2023.
- [14] A. J. R. Taduran and L. P. Piao, "Analyzing the Performance of a 2 . 72kW p Rooftop Grid- tied Photovoltaic System in Tarlac City , Philippines," vol. 73, no. 9, pp. 318–327, 2025.
- [15] A. Pengaruh, S. Radiation, and T. Efisiensi, "ANALYSIS THE EFFECT OF SOLAR RADIATION ON THE EFFICIENCY OF PV PLANT 50 KWP ROOFTOP UNPAM," vol. 6, no. 02, 2023.
- [16] M. Syukron, A. Prasetyaningtyas, K. T. Pambudi, and A. Zuhair, "ANALISIS RUGI DAYA KABEL DC DAN AC PADA PLTS," vol. 14, no. 2.
- [17] I. E. C. Ts, *IEC TS 61724-3 TECHNICAL*. 2016.