OPTIMASI DAN PENYUSUNAN DATASET KOREKSI PARAMETER *LOSSES* PVSYST BERBASIS METODE *GENERALIZED REDUCED GRADIENT* (GRG) UNTUK TIGA SUMBER DATA METEOROLOGI SATELIT: STUDI KASUS PLTS ATAP ON-GRID GANDOANG CILEUNGSI

TESIS

Diajukan untuk memenuhi
Persyaratan gelar Magister Teknik

MUHID SYAHROMI

NIM. 092024090206

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK DAN ILMU KOMPUTER

UNIVERSITAS GLOBAL JAKARTA

2026


JGU
Jakarta Global
University

PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam naskah tesis ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu perguruan tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam umber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata didalam naskah tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia tesis dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Depok, 06 Agustus 2026

Mahasiswa,



Muhid Syahromi

NPM. 092024090206


JGU
Jakarta Global
University

HALAMAN PENGESAHAN PEMBIMBING

Tesis ini diajukan oleh:

Nama	:	Muhid Syahromi
NPM	:	092024090206
Program Studi	:	Magister Teknik Elektro
Judul Tesis	:	Optimasi dan Penyusunan Dataset Koreksi *Parameter Losses* PVsyst Berbasis *Metode Generalized Reduced Gradient* (GRG) untuk Tiga Sumber Data Meteorologi Satelit: Studi Kasus PLTS Atap On-Grid Gandoang, Cileungsi

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer Universitas Global Jakarta.

DEWAN PEMBIMBING

Pembimbing 1:

Dr. Eng. Yanuar Zulardiansyah Arief, S.T., M.T.
NIK.S09201911003

Pembimbing 2:

Hamzah, S.T., M.T., Ph.D.
NIK.S092023080003

Ketua Program Studi
Magister Teknik Elektro

Hamzah, S.T., M.T., Ph.D.
NIK.S092023080003

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 06 Agustus 2026


JGU
Jakarta Global
University

HALAMAN PENGESAHAN DEWAN PENGUJI

Tesis ini diajukan oleh:

Nama	:	Muhid Syahromi
NPM	:	092024090206
Program Studi	:	Magister Teknik Elektro
Judul Tesis	:	Optimasi dan Penyusunan Dataset Koreksi Parameter *Losses* PVsyst Berbasis *Metode Generalized Reduced Gradient* (GRG) untuk Tiga Sumber Data Meteorologi Satelit: Studi Kasus PLTS Atap On-Grid Gandoang Cileungsi

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer Universitas Global Jakarta.

DEWANPENGUJI

Penguji 1 : Dr. Antonius Darma Setiawan, S.Si., M.T. ( )

Penguji 2 : Dr. Herwanto, S.Kom., M.Si. ( )

Penguji 3 : Adhes Gamayel, S.T., M.T., Ph.D. ( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 06 Agustus 2026


JGU
Jakarta Global
University

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmatNya, saya dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik pada Program Studi Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer Universitas Global Jakarta. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1) Bapak Dr. Yanuar Zulardiansyah Arief, S.T., M.T. dan Bapak Hamzah, S.T., M.T., Ph.D., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;
2) pihak PT SUN Energy yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang saya perlukan;
3) orang tua, istri, anak dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
4) sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan tesis ini.

Akhir kata, saya berharap Alloh SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 06 Agustus 2026

Muhid Syahromi


JGU
Jakarta Global
University

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI AKADEMIS

Sebagai sivitas akademika Universitas Global Jakarta, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama	:	Muhid Syahromi
NPM	:	092024090206
Program Studi	:	S2 Tenik Elektro
Jenis Karya Ilmiah	:	Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Global Jakarta Hak Bebas Royalti Non-eksklusif (None-exclusive Royalty Free Right) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Optimasi dan Penyusunan Dataset Koreksi *Parameter Losses* PVsyst Berbasis *Metode Generalized Reduced Gradient* (GRG) untuk Tiga Sumber Data Meteorologi Satelit: Studi Kasus PLTS Atap On-Grid Gandoang, Cileungsi

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti/Noneksklusif ini Universitas Global Jakarta berhak menyimpan mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan mempublikasikan tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Depok, 06 Agustus 2026

Yang menyatakan



Muhid Syahromi


JGU
Jakarta Global
University

ABSTRAK

Simulasi produksi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menggunakan PVsyst sangat bergantung pada kualitas data meteorologi input dan kesesuaian parameter losses terhadap kondisi lokasi. Penelitian ini menerapkan metode Generalized Reduced Gradient (GRG) melalui Excel Solver untuk mengoptimalkan parameter losses PVsyst (soiling bulanan, Wind Loss Constant Factor/Uv, Light Induced Degradation/LID, dan module mismatch) pada PLTS atap on-grid 245,3 kWp di Gandoang, Cileungsi, menggunakan tiga sumber data meteorologi satelit: NASA POWER, ERA5, dan Solcast. Optimasi dilakukan terhadap data produksi aktual periode Januari–Desember 2025 dan divalidasi independen pada periode Mei–Desember 2024. Hasil menunjukkan RMSE turun hingga 1.684 kWh untuk Ground, serta 80–786 kWh untuk ketiga sumber satelit pada periode uji coba dan validasi independen, setara dengan nRMSE yang membaik dari kisaran 5,57–9,78% menjadi 4,51–7,21%. Deviasi Tahunan E-Grid pasca-optimasi tetap di bawah 3%, jauh di dalam batas toleransi ketidakpastian produksi PPA yang umum (5–10%). Kontribusi utama penelitian ini adalah dataset koreksi parameter losses PVsyst bulanan (soiling Januari–Desember, Uv, dan LID) untuk masing-masing sumber meteorologi satelit, yang dapat menjadi referensi awal kalibrasi bagi praktisi PLTS di wilayah beriklim tropis serupa. Dataset ini bersifat sebagai faktor koreksi empiris gabungan yang merepresentasikan penyesuaian parameter losses fisik sekaligus kompensasi bias sistematis GHI satelit, sehingga penerapannya pada lokasi atau teknologi modul lain memerlukan validasi ulang. Penelitian ini membuktikan bahwa metode GRG efektif, praktis, dan dapat digeneralisasi untuk kalibrasi parameter *losses* PVsyst berbasis data produksi aktual di wilayah tropis.

Kata Kunci: PVsyst, *Generalized Reduced Gradient*, optimasi parameter *losses*, simulasi PLTS, data meteorologi satelit, NASA POWER, ERA5, Solcast, *soiling loss*, PLTS atap *on-grid*, Cileungsi

ABSTRACT

Photovoltaic (PV) power plant production simulation using PVsyst is highly dependent on the quality of input meteorological data and the suitability of loss parameters to local conditions. This study applies the Generalized Reduced Gradient (GRG) method via Excel Solver to optimize PVsyst loss parameters (monthly soiling, Wind Loss Constant Factor/Uv, Light Induced Degradation/LID, and module mismatch) for a 245.3 kWp on-grid rooftop PV system in Gandoang, Cileungsi, using three satellite meteorological sources: NASA POWER, ERA5, and Solcast. Optimization was performed against actual production data from January–December 2025 and independently validated using May–December 2024 data. Results show RMSE reductions of up to 1,684 kWh for Ground, and 80–786 kWh across the three satellite sources during calibration and independent validation, corresponding to nRMSE improving from a range of 5.57–9.78% to 4.51–7.21%. The post-optimization Annual E-Grid Deviation remained below 3%, well within the typical 5–10% production-uncertainty tolerance band used in PPA practice. The study's principal contribution is a structured monthly PVsyst loss-parameter correction dataset (soiling, Uv, and LID) for each satellite source, offered as an initial calibration reference for PV practitioners in similar tropical regions. This dataset constitutes a combined empirical correction factor that reflecting both genuine physical loss-parameter adjustment and compensation for systematic satellite GHI bias, so its application to other sites or module technologies requires independent re-validation. This study demonstrates that the GRG method is an effective, practical, and generalizable approach for calibrating PVsyst loss parameters based on actual production data in tropical regions.

Keywords: *PVsyst, Generalized Reduced Gradient, loss parameter optimization, PV system simulation, satellite meteorological data, NASA POWER, ERA5, Solcast, soiling loss, on-grid rooftop PV, Cileungsi*


JGU
Jakarta Global
University

DAFTAR ISI

PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS ii
HALAMAN PENGESAHAN PEMBIMBING iii
HALAMAN PENGESAHAN DEWAN PENGUJI iv
KATA PENGANTAR v
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI AKADEMIS vi
ABSTRAK vii
ABSTRACT viii
DAFTAR ISI ix
DAFTAR GAMBAR xii
DAFTAR TABEL xiii
LAMPIRAN xv
DAFTAR ISTILAH xvi
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Penelitian 4
1.4 Manfaat Penelitian 5
1.5 Batasan Penelitian 5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 7
2.1 Dasar Teoretis 7
2.1.1 Sistem PLTS Atap *On-Grid* 7
2.1.2 Data Meteorologi Satelit untuk Simulasi PV 8
2.1.3 Simulasi PVsyst dan Model Fisis 9
2.1.4 Parameter *Losses* dalam PVsyst 11
2.1.5 Metode Optimasi Generalized Reduced Gradient (GRG) 12
2.1.6 Metrik Evaluasi Akurasi Model Simulasi 13
2.2 Definisi Konsep 15
2.3 Variabel dan Indikator Penelitian 16
2.4 Kerangka Pemikiran 17
2.5 Hipotesis Penelitian 18
2.5.1 Hipotesis H1 Kualitas Data Meteorologi Satelit 19

2.5.2 Hipotesis H2 Efektivitas Optimasi GRG 19
2.5.3 Hipotesis H3 Kemampuan Generalisasi Parameter Optimal 20
2.6 Kajian Penelitian Terdahulu dan *Literature Review* 20
2.7 Identifikasi Celah Penelitian (*Research Gap*) 22
2.8 Kebaruan Penelitian (*Novelty*) 23
BAB III METODE PENELITIAN 25
3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian 25
3.2 Fokus Penelitian 25
3.3 Peralatan, Perangkat Lunak, dan Definisi Variabel 26
3.3.1 Sistem PLTS yang Diteliti 26
3.3.2 Perangkat Lunak yang Digunakan 28
3.3.3 Definisi Variabel Penelitian 29
3.4 Alur Penelitian 29
3.5 Lokasi dan Objek Penelitian 31
3.6 Data Penelitian 31
3.7 Teknik Pengumpulan Data 32
3.7.1 Data Spesifikasi Sistem PLTS 32
3.7.2 Data Produksi Aktual PLTS 32
3.7.3 Data Meteorologi 33
3.8 Teknik Analisis Data 34
3.8.1 Simulasi PVsyst dan Ekstraksi E-Grid 34
3.8.2 Optimasi Parameter Losses dengan Metode GRG 34
3.8.3 Evaluasi Metrik Akurasi 37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 39
4.1 Gambaran Umum Lokasi Penelitian 39
4.1.1 Deskripsi Lokasi dan Kondisi Klimatologi 39
4.1.2 Spesifikasi Teknis Sistem PLTS 39
4.1.3 Data Iradiasi Surya dan Pra-Pemrosesan Data 40
4.2 Penyajian Hasil Penelitian 48
4.2.1 Simulasi Baseline PVsyst Parameter *Losses* Default 49
4.2.2 Optimasi Parameter *Losses* dengan Metode GRG 52
4.2.3 Rekapitulasi Seluruh Hasil 66
4.3 Pembahasan 68
4.3.1 Kualitas Data GHI Satelit sebagai Input Simulasi 68

4.3.2 Analisis Kinerja Simulasi Baseline SIM-0 70
4.3.3 Analisis Proses Optimasi GRG dan Gap Model 71
4.3.4 Interpretasi Parameter *Losses* Optimal 76
4.3.5 Sintesis dan Implikasi Praktis 78
BAB V PENUTUP 80
5.1 Kesimpulan 80
5.2 Saran 82
DAFTAR PUSTAKA 85

DAFTAR GAMBAR

Gambar II-1 Sistem PLTS On-grid (Barla, 2011) 7
Gambar II-2 Kerangka Pemikiran Penelitian..... 18
Gambar III-1 Single Line Diagram..... 26
Gambar III-2 Diagram Alir Penelitian..... 30
Gambar IV-1 Komparasi GHI Bulanan Januari 2024–Desember 2025 47
Gambar IV-2 Komparatif Suhu Udara Bulanan 2024–2025 48
Gambar IV-3 Kecepatan Angin Bulanan 2024–2025..... 48
Gambar IV-4 E-Grid Aktual vs Hasil SIM-0 Sumber Meteorologi, 2025 .. 51
Gambar IV-5 Diagram Akurasi SIM-0..... 52
Gambar IV-6 Perbandingan E-Grid Simulasi Ground, 2025..... 56
Gambar IV-7 Perbandingan E-grid NASA: Uji Coba dan Validasi 59
Gambar IV-8 Perbandingan E-Grid ERA5: Uji Coba dan Validasi 62
Gambar IV-9 Perbandingan E-Grid Solcast: Uji Coba dan Validasi..... 66
Gambar IV-10 Reduksi RMSE Uji coba dan Validasi 68

DAFTAR TABEL

Tabel II-1 Penelitian Terdahulu 20
Tabel III-1 Spesifikasi Teknis Modul PV 26
Tabel III-2 Spesifikasi Teknis Inverter 27
Tabel III-3 Spesifikasi Teknis Sensor Irradiance 28
Tabel III-4 Variabel Model *Surrogate* 36
Tabel III-5 Batasan Optimasi GRG 37
Tabel IV-1 Spesifikasi Teknis Sistem PLTS Gandoang, Cileungsi 40
Tabel IV-2 Sumber Data Meteorologi yang Digunakan dalam Penelitian .. 41
Tabel IV-3 Data Meteorologi Bulanan Sumber Ground 42
Tabel IV-4 Data Meteorologi Bulanan Sumber NASA POWER 43
Tabel IV-5 Data Meteorologi Bulanan Sumber ERA5 44
Tabel IV-6 Data Meteorologi Bulanan Sumber Solcast 45
Tabel IV-7 Pembagian Periode Data dan Penggunaannya dalam Penelitian 46
Tabel IV-8 Konfigurasi Parameter Losses pada Simulasi Baseline SIM-0. 49
Tabel IV-9 Hasil Simulasi Dasar E-Grid Tahun 2025 (kWh/bulan) 50
Tabel IV-10 Metrik Akurasi Simulasi SIM-0, Januari–Desember 2025 51
Tabel IV-11 Batasan Parameter Variabel dalam Optimasi GRG 53
Tabel IV-12 E-Grid Sumber Ground, 2025 (kWh/bulan) 54
Tabel IV-13 Parameter Losses Hasil GRG-1 Sumber Ground 55
Tabel IV-14 Metrik Akurasi Sumber Ground, 2025 56
Tabel IV-15 E-Grid Sumber NASA POWER, 2025 (kWh/bulan) 57
Tabel IV-16 Parameter Losses Hasil GRG-1 Sumber NASA POWER 57
Tabel IV-17 Metrik Akurasi Uji Coba Sumber NASA POWER, 2025 58
Tabel IV-18 E-Grid Validasi NASA POWER 2024 (kWh/bulan) 58
Tabel IV-19 Metrik Akurasi Validasi NASA POWER, 2024 59
Tabel IV-20 E-Grid Uji Coba Sumber ERA5, 2025 (kWh/bulan) 60
Tabel IV-21 Parameter Losses Hasil GRG-1 Sumber ERA5 60
Tabel IV-22 Metrik Akurasi Uji Coba Sumber ERA5, 2025 61
Tabel IV-23 E-Grid Validasi ERA5, 2024 (kWh/bulan) 61
Tabel IV-24 Metrik Akurasi Uji Validasi ERA5, 2024 62
Tabel IV-25 E-Grid Uji Coba Sumber Solcast, 2025 (kWh/bulan) 63
Tabel IV-26 Parameter Losses GRG Uji Coba Sumber Solcast 63

Tabel IV-27 Metrik Akurasi Uji Coba Sumber Solcast, 2025..... 64
Tabel IV-28 E-Grid Uji Validasi - Solcast, 2024 (kWh/bulan)..... 64
Tabel IV-29 Metrik Akurasi Uji Validasi - Solcast, 2024..... 65
Tabel IV-30 Rekapitulasi Metrik Akurasi Seluruh Skenario..... 66

LAMPIRAN

Lampiran 1. Surat dan Form

Lampiran 2. Gambar PLTS

Lampiran 3. Hasil Simulasi PVSyst 7.4

Lampiran 4. Hasil Optimasi GRG


JGU
Jakarta Global
University

DAFTAR ISTILAH

Baseline (SIM-0): Simulasi awal sistem PLTS menggunakan parameter *losses default* bawaan perangkat lunak PVsyst sebagai titik referensi awal.

E-Grid: Energi listrik arus bolak-balik (AC) bersih yang dihasilkan oleh sistem PLTS dan disalurkan ke jaringan distribusi (*grid*) atau beban.

EBT (Energi Baru Terbarukan): Sumber energi yang dapat diperbarui secara alamiah dan berkelanjutan, seperti energi surya, angin, dan air.

ERA5: Basis data reanalisis meteorologi global generasi kelima yang dikembangkan oleh *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF).

Generalized Reduced Gradient (GRG): Algoritma optimasi nonlinier berbasis gradien yang digunakan untuk menyelesaikan masalah optimasi berkendala secara efisien.

GHI (*Global Horizontal Irradiance*): Total intensitas radiasi matahari yang diterima oleh permukaan horizontal per satuan luas dan waktu, mencakup radiasi langsung (*direct*) maupun baur (*diffuse*).

Ground Measurement: Pengukuran parameter cuaca atau iradiasi matahari secara langsung di lokasi proyek menggunakan instrumen lapangan (seperti piranometer).

Inverter: Perangkat elektronika daya yang berfungsi mengubah arus listrik searah (DC) hasil produksi modul surya menjadi arus listrik bolak-balik (AC).

LID (*Light Induced Degradation*): Penurunan efisiensi atau performa awal modul surya akibat paparan sinar matahari pertama kali pada sel fotovoltaik.

Losses: Kerugian atau susut daya yang terjadi di sepanjang sistem PLTS, mulai dari konversi energi surya di modul hingga energi dialirkan ke jaringan listrik.

MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*): Metrik evaluasi statistika yang menunjukkan rata-rata persentase kesalahan absolut antara nilai hasil simulasi dengan nilai aktual.

MBE (*Mean Bias Error*): Metrik evaluasi statistika yang menunjukkan arah bias sistematis dari suatu model, apakah cenderung terlalu tinggi (*overestimate*) atau terlalu rendah (*underestimate*).

Module Mismatch Power Loss: Kerugian daya listrik yang terjadi akibat ketidakseragaman karakteristik elektrik antar modul surya di dalam satu untaian (*string*) atau array.

MPP (*Maximum Power Point*): Titik operasi pada kurva karakteristik elektrik di mana modul atau array surya menghasilkan daya output maksimal.

NASA POWER: Program data meteorologi berbasis satelit yang disediakan oleh NASA untuk mendukung riset energi terbarukan dan agroklimatologi.

On-Grid: Sistem PLTS yang terhubung secara paralel dan sinkron dengan jaringan listrik komersial/distribusi utama (seperti jaringan PLN) tanpa menggunakan baterai.

PERC (*Passivated Emitter and Rear Cell*): Teknologi sel surya modern yang memiliki lapisan pasivasi di bagian belakang untuk memantulkan kembali cahaya yang menembus sel, meningkatkan efisiensi modul.

Piranometer: Alat atau sensor khusus di lapangan yang digunakan untuk mengukur besaran intensitas iradiasi surya global (GHI).

PLTS Atap: Pembangkit Listrik Tenaga Surya yang komponen modul fotovoltaiknya diinstal di atas atap bangunan, gedung, atau pabrik.

PV (*Photovoltaic*): Teknologi konversi energi yang mengubah radiasi cahaya matahari secara langsung menjadi energi listrik arus searah (DC).

PVsyst: Perangkat lunak simulasi standar industri fotovoltaik yang komprehensif untuk memodelkan, menganalisis, dan memproyeksikan estimasi produksi energi sistem PLTS.

R^2 (Koefisien Determinasi): Metrik statistik yang mengukur kekuatan korelasi temporal atau seberapa baik variasi data aktual dapat dijelaskan oleh model simulasi.

RMSE (*Root Mean Square Error*): Metrik evaluasi akurasi yang mengukur akar kuadrat dari rata-rata selisih kuadrat antara nilai prediksi simulasi dan nilai produksi aktual.

Soiling Loss: Kerugian produksi energi PLTS akibat terhalangnya cahaya matahari oleh akumulasi kotoran, debu, atau polutan pada permukaan kaca modul PV.

Solcast: Penyedia data meteorologi komersial berbasis satelit yang mengkhususkan diri pada data iradiasi matahari resolusi tinggi untuk industri PLTS.

Surrogate Model: Model pendekatan fisis linier yang dibangun (dalam hal ini di Excel) untuk menggantikan kalkulasi internal PVsyst yang kompleks agar proses iterasi optimasi GRG berjalan lebih cepat dan efisien.

Wind Loss Constant Factor (Uv): Komponen koefisien perpindahan panas konvektif yang bergantung pada kecepatan angin dalam model termal modul PVsyst.


JGU
Jakarta Global
University

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk, perkembangan industri, dan menguatnya aktivitas ekonomi nasional. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral mencatat konsumsi listrik nasional tumbuh rata-rata 4–5% per tahun dalam beberapa tahun terakhir (Kementerian ESDM, 2023). Ketergantungan yang masih besar pada bahan bakar fosil, di sisi lain, terus menekan emisi gas rumah kaca dan ketahanan energi jangka panjang, sehingga diversifikasi ke energi baru terbarukan (EBT) menjadi salah satu agenda prioritas pemerintah, sebagaimana tercermin dalam target bauran EBT nasional sebesar 23% yang ditetapkan dalam Rencana Umum Energi Nasional (Kementerian ESDM, 2023).

Energi surya merupakan salah satu sumber EBT paling prospektif untuk dikembangkan di Indonesia. Letak geografis Indonesia di kawasan tropis menghasilkan rata-rata intensitas radiasi matahari sekitar 4,5–5,5 kWh/m²/hari (World Bank Group, 2024). Potensi ini mendorong pertumbuhan pesat Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), khususnya sistem PLTS atap on-grid yang dapat langsung diintegrasikan ke jaringan distribusi eksisting tanpa memerlukan lahan tambahan. Dalam konteks pertumbuhan tersebut, kemampuan memperkirakan produksi energi secara akurat menjadi kebutuhan mendasar, baik pada tahap perencanaan teknis, analisis kelayakan investasi, maupun evaluasi kinerja sistem yang telah beroperasi, sebab keputusan pembangunan PLTS secara komersial pada dasarnya bertumpu pada seberapa dapat dipercaya angka produksi yang diperkirakan sejak awal.

PVsyst menjadi salah satu perangkat lunak simulasi yang paling luas digunakan, baik oleh praktisi industri maupun akademisi, untuk memodelkan performa sistem fotovoltaik secara komprehensif (PVsyst SA, 2024). Akurasi keluaran PVsyst pada dasarnya ditentukan oleh tiga kelompok masukan yang saling berinteraksi: data meteorologi (terutama Global Horizontal Irradiance/GHI dan suhu udara), parameter losses sistem (soiling, mismatch, wiring, shading), dan

parameter model termal modul (koefisien konveksi Uc dan Uv). Ketidaktepatan pada salah satu kelompok ini dapat berdampak signifikan terhadap hasil simulasi secara keseluruhan (Masters, 2005), (Jain et al., 2025).

Pada aspek data meteorologi, penggunaan data hasil pengukuran langsung di lapangan (ground measurement) masih sangat terbatas di Indonesia, mengingat tingginya biaya instalasi dan pemeliharaan piranometer serta belum meratanya jaringan stasiun pengukuran dengan rekam data historis yang memadai (Sengupta et al., 2018). Kondisi inilah yang mendorong banyak peneliti dan praktisi beralih ke data meteorologi berbasis satelit, yang umumnya tersedia gratis dan mudah diakses dengan cakupan spasial luas, tanpa memerlukan investasi instrumen di lapangan. Penelitian ini menggunakan tiga sumber data satelit yang bersifat terbuka dan tanpa biaya, yaitu NASA POWER, ERA5 (Copernicus/ECMWF), dan Solcast, sebagai alternatif input simulasi PVsyst untuk sistem PLTS di Gandoang, Cileungsi, Kabupaten Bogor.

Persoalannya, ketersediaan data satelit gratis saja belum menjamin akurasi simulasi. PVsyst menyediakan basis data meteorologi bawaan yang umumnya disusun dari rata-rata iklim jangka panjang (typical meteorological year), sehingga secara konsep mencerminkan kondisi klimatologis rata-rata suatu wilayah, bukan kondisi aktual pada periode operasional tertentu. Basis data bawaan tersebut, termasuk parameter losses default yang menyertainya, pada praktiknya jarang diperbarui mengikuti kondisi cuaca dan performa sistem yang sesungguhnya terjadi di lapangan pada periode yang sedang dianalisis. Akibatnya, walaupun data satelit terkini digunakan sebagai input, hasil simulasi tetap berpotensi menyimpang dari produksi aktual apabila parameter losses dan model termal yang menyertainya belum dikalibrasi ulang terhadap kondisi terkini. Deviasi ini diperparah oleh karakteristik data satelit itu sendiri, yang memiliki bias sistematis akibat keterbatasan resolusi spasial, ketidaksempurnaan model atmosfer, serta pengaruh iklim mikro setempat (Gueymard & Wilcox, 2011), persoalan yang menjadi lebih kompleks di wilayah tropis dengan dinamika tutupan awan tinggi seperti Indonesia (AlFaraj et al., 2024).

Studi oleh (Jain et al., 2025) menunjukkan bahwa variasi parameter losses dan koefisien termal modul dapat memberi pengaruh signifikan terhadap hasil simulasi energi, terutama di lokasi dengan suhu lingkungan tinggi seperti iklim tropis basah Indonesia. Namun demikian, belum ditemukan kajian yang secara spesifik mengkuantifikasi faktor koreksi parameter losses PVsyst yang representatif terhadap kondisi iklim dan lingkungan di Gandoang, Cileungsi. Kombinasi antara data meteorologi bawaan/satelit yang belum tentu mutakhir dan parameter losses default yang tidak representatif inilah yang menjadi akar deviasi antara hasil simulasi PVsyst dan produksi energi aktual PLTS.

Deviasi tersebut bukan sekadar persoalan teknis simulasi, melainkan berimplikasi langsung pada keandalan PVsyst sebagai dasar pengambilan keputusan. Estimasi produksi energi yang terlalu optimistis maupun terlalu konservatif dapat memengaruhi analisis kelayakan investasi, skema pembiayaan, dan proyeksi imbal hasil suatu proyek PLTS, sehingga pada akhirnya berdampak pada rencana pembangunan PLTS secara komersial. Semakin akurat simulasi yang dihasilkan, semakin dapat diandalkan pula keputusan teknis dan finansial yang diambil oleh pengembang maupun investor.

Berdasarkan persoalan tersebut, penelitian ini mengusulkan pendekatan kalibrasi parameter losses dan model termal PVsyst menggunakan metode optimasi Generalized Reduced Gradient (GRG), yaitu metode optimasi nonlinear berbasis gradien yang efektif menyelesaikan masalah optimasi berkendala secara efisien (Lasdon et al., 1978). Proses kalibrasi diterapkan secara terpisah untuk masing-masing sumber data meteorologi satelit NASA POWER, ERA5, dan Solcast dengan tujuan meminimalkan deviasi antara hasil simulasi PVsyst dan data produksi aktual PLTS atap on-grid 245,3 kWp di Gandoang, Cileungsi. Melalui pendekatan ini, penelitian diharapkan menghasilkan rekomendasi sumber data satelit yang paling sesuai serta satu set parameter losses terkalibrasi yang dapat menjadi acuan bagi simulasi PLTS lain dengan karakteristik iklim tropis serupa.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana tingkat akurasi hasil simulasi PVsyst dengan parameter losses default terhadap data produksi aktual PLTS di Gandoang, Cileungsi?
2. Bagaimana perbandingan akurasi data meteorologi satelit (NASA POWER, ERA5, dan Solcast) dalam simulasi PVsyst terhadap produksi aktual?
3. Bagaimana nilai optimal parameter losses (soiling, thermal Uv, mismatch, dan LID) yang dihasilkan dari optimasi GRG untuk meningkatkan akurasi simulasi?
4. Bagaimana peningkatan akurasi simulasi PVsyst setelah implementasi parameter losses hasil optimasi berdasarkan metrik RMSE, MAPE, MBE, dan R^2?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengevaluasi akurasi hasil simulasi PVsyst dengan parameter losses default terhadap data produksi aktual PLTS di Gandoang, Cileungsi.
2. Menganalisis dan membandingkan akurasi tiga sumber data meteorologi satelit (NASA POWER, ERA5, dan Solcast) dalam simulasi PVsyst.
3. Menentukan nilai optimal parameter losses (soiling, thermal Uv, mismatch, dan LID) menggunakan metode GRG untuk meningkatkan akurasi simulasi.
4. Mengukur peningkatan akurasi simulasi PVsyst setelah implementasi parameter losses hasil optimasi berdasarkan metrik RMSE, MAPE, MBE, dan R^2.
5. Memvalidasi penerapan parameter losses hasil optimasi pada periode berbeda menggunakan data meteorologi satelit.
6. Menyusun dataset koreksi parameter losses PVsyst (soiling bulanan, Wind Loss Constant Factor/Uv, dan Light Induced Degradation/LID) untuk masing-masing sumber data meteorologi satelit sebagai

referensi kalibrasi awal simulasi PLTS berbasis data satelit di daerah dengan karakteristik iklim tropis serupa.

Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan reliabilitas simulasi produksi energi PLTS berbasis data meteorologi satelit melalui pendekatan optimasi parameter model.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi dalam pengembangan metode optimasi parameter losses dan model termal pada simulasi PLTS menggunakan PVsyst berbasis data satelit.
2. Menjadi referensi penelitian terkait peningkatan akurasi simulasi PLTS melalui metode optimasi *Generalized Reduced Gradient* (GRG).
3. Menghasilkan dataset koreksi parameter losses PVsyst yang terstruktur dan siap-pakai (bulanan soiling, Uv, dan LID) untuk basis data NASA POWER, ERA5, dan Solcast di wilayah Gandoang, Cileungsi, sebagai referensi kalibrasi awal bagi praktisi pada lokasi berkarakteristik serupa.
4. Meningkatkan akurasi estimasi produksi energi PLTS pada tahap perencanaan dan evaluasi kinerja.
5. Mengurangi deviasi antara hasil simulasi dan produksi aktual PLTS.

1.5 Batasan Penelitian

Agar penelitian lebih terarah, maka penelitian ini dibatasi pada beberapa hal berikut:

1. Lokasi penelitian difokuskan pada sistem PLTS Atap On-Grid 245.3 kWP di Gandoang, Cileungsi (koordinat -6.411271, 107.012113).
2. Data meteorologi yang digunakan berasal dari NASA POWER, ERA5 dan Solcast.
3. Data produksi aktual PLTS yang digunakan mencakup dua periode: periode uji optimasi selama 12 bulan (Januari–Desember 2025) dan

periode validasi independen selama 8 bulan (Mei–Desember 2024), dengan periode gangguan operasional (downtime) yang telah teridentifikasi dikeluarkan dari analisis akurasi.

4. Simulasi sistem PLTS dilakukan menggunakan perangkat lunak PVsyst 7.4.
5. Parameter yang dioptimasi meliput soiling loss, thermal model Uv, mismatch loss dan LID
6. Metode optimasi yang digunakan adalah *Generalized Reduced Gradient* (GRG) melalui fitur Solver pada Microsoft Excel.
7. Evaluasi hasil simulasi dilakukan menggunakan parameter error seperti RMSE, nRMSE, MAPE, MBE dan R^2.
8. Penelitian tidak membahas analisis ekonomi, degradasi modul jangka panjang, maupun optimasi desain sistem PLTS.
9. Dataset koreksi parameter losses yang dihasilkan bersifat sebagai faktor kalibrasi empiris gabungan yang merepresentasikan penyesuaian parameter losses fisik sekaligus kompensasi bias sistematis GHI satelit; dataset ini spesifik terhadap lokasi, teknologi modul, dan sumber meteorologi yang diteliti, sehingga penerapannya pada sistem lain memerlukan validasi ulang.


JGU
Jakarta Global
University

DAFTAR PUSTAKA

AlFaraj, J., Popovici, E., & Leahy, P. (2024). Solar Irradiance Database Comparison for PV System Design: A Case Study. *Sustainability (Switzerland)*, *16*(15), 1–26. https://doi.org/10.3390/su16156436

Aprilia, A., Wahidin, A. B., Abdurrahman, A. F., Prihanto, S., & Al-Fath, Y. (2025). Comparative Validation of NASA POWER and ERA5 Satellite-Based Meteorological Data Using BMKG Observations in Bandar Lampung, Indonesia-Ayu Aprilia et.al Comparative Validation of NASA POWER and ERA5 Satellite-Based Meteorological Data Using BMKG Observati. *Informatika Dan Sains*, *15*(02), 2025. https://doi.org/10.54209/infosains.v15i02

ASHRAE. (2014). *Guideline 14-2014: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Barla E., A.-D. D. (2011). Researches Viewing The Optimal Electric Energy Producing With PV. II(2).

Bright, J. M. (2019). Solcast: Validation of a satellite-derived solar irradiance dataset. *Solar Energy*, *189*, 435–449. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.086

BMKG. (2023). Buletin Iklim Jawa Barat 2023. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika.

Canadian Solar. (2021). BiHiKu6 CS6W-550MB-AG datasheet V1.0C3. CSI Solar Co., Ltd.

Catherine E Chan, David N. R. Payne, Brett J. Hallam, Malcolm D. Abbott, Tsun H. Fung, Alison M. Wenham, Budi S. Tjahjono, and S. R. W. (2016). *Rapid Stabilization of High-Performance Multicrystalline P-type Silicon PERC Cells*. *6*(6), 1473–1479. https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2016.2606704

Christian Schill, Anne Anderson, C. B.-J. (2022). Soiling Losses – Impact on the Performance of Photovoltaic Power Plants. In Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and

Lecture Notes in Bioinformatics) (Vol. 1770). https://doi.org/10.1007/3-540-46541-3_21

Dirnberger, D., Kräling, U., Müllejans, H., Salis, E., Emery, K., Hishikawa, Y., & Kiefer, K. (2014). Progress in photovoltaic module calibration: Results of a worldwide intercomparison between four reference laboratories. *Measurement Science and Technology*, *25*(10), 1–24. https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/10/105005

DNV. (2024). Review and validation of Solcast historical and TMY data. DNV Energy Systems.

Faiman, D. (2008). Assessing the Outdoor Operating Temperature of Photovoltaic Modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, *20*(1), 6–11. https://doi.org/10.1002/pip

Fouad, M. M., Shihata, L. A., & Morgan, E. S. I. (2017). An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *80*(May), 1499–1511. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.141

Fylstra, D., Lasdon, L., Watson, J., & Waren, A. (1998). Design and use of the Microsoft Excel Solver. *Interfaces*, *28*(5), 29–55. https://doi.org/10.1287/inte.28.5.29

Gueymard, C. A., & Wilcox, S. M. (2011). Assessment of spatial and temporal variability in the US solar resource from radiometric measurements and predictions from models using ground-based or satellite data. *Solar Energy*, *85*(5), 1068–1084. https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.02.030

Gueymard, C. A., & Yang, D. (2020). Worldwide validation of CAMS and MERRA-2 reanalysis aerosol optical depth products using 15 years of AERONET observations. *Atmospheric Environment*, *225*, 117216. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117216

Huawei Solar. (2022). SUN2000-100KTL-INM0 technical specifications. Huawei Technologies Co., Ltd.

Jain, S., Abdelrahim, M., Abdallah, A. A., Pillai, D. S., & Bayhan, S. (2025). Performance Modeling of Rooftop PV Systems in Arid Climate, a Case Study for Qatar: Impact of Soiling Losses and Albedo Using PVsyst and SAM. *Energies*, *18*(22). https://doi.org/10.3390/en18225876

Journée, M., & Bertrand, C. (2010). Improving the spatio-temporal distribution of surface solar radiation data by merging ground and satellite measurements. *Remote Sensing of Environment*, *114*(11), 2692–2704. https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.06.010

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2023). Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) dan Kebijakan Energi Nasional. Kementerian ESDM Republik Indonesia.

Koehl, M., Heck, M., Wiesmeier, S., & Wirth, J. (2011). Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *95*(7), 1638–1646. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.01.020

Lasdon, L. S., Waren, A. D., Jain, A., & Ratner, M. (1978). Design and Testing of a Generalized Reduced Gradient Code for Nonlinear Programming. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, *4*(1), 34–50. https://doi.org/10.1145/355769.355773

Leon S. Lasdon, Richard L., F. M. R. (1974). Nonlinear optimization using the generalized reduced gradient method. *Van Nostrand's Scientific Encyclopedia*. https://doi.org/10.1002/9780471743989.vse9104.pub2

Lozano Medina, J. C., Henríquez Concepción, V., Mendieta Pino, C. A., & León Zerpa, F. (2024). Proposal of an optimization tool for demand response in island electricity systems (IES) using the Simplex method and Generalized reduced gradient (GRG). *Journal of King Saud University - Science*, *36*(9). https://doi.org/10.1016/j.jksus.2024.103345

Mansur, A. (2021). Analisa Kinerja Plts on Grid 50 Kwp Akibat Efek Bayangan Menggunakan Software Pvsyst. *Transmisi*, *23*(1), 28–33. https://doi.org/10.14710/transmisi.23.1.28-33

Masters, G. M. (2005). Renewable and Efficient Electric Power Systems. In *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. https://doi.org/10.1002/0471668826

Memon, S. A., Upadhyay, D. S., & Patel, R. N. (2023). Optimization of solar and battery-based hybrid renewable energy system augmented with bioenergy and hydro energy-based dispatchable source. *IScience*, *26*(1), 105821. https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105821

Mermoud, A., & Wittmer, B. (2014). PVsyst user's manual. *Pvsyst Sa*, (January), 1–102.

Mokhtar S. Bazaraa, Hanif D. Sherali, C. M. S. (2006). *NonLinear Progamming Theory and Algorithms*. 1–51. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68651-4_4

PVsyst SA. (2024). PVsyst 7.4 help documentation: Project design, array and system losses. PVsyst SA. https://www.pvsyst.com/help-pvsyst7/

Raji, L., Razak, A. A., & Sharol, A. F. (2025). Comparative assessment of PV simulation tools for a megawatt-scale rooftop solar photovoltaic system in tropical climate. *Next Energy*, *9*(September), 100452. https://doi.org/10.1016/j.nxener.2025.100452

Sahrin, A., Abadi, I., & Musyafa, A. (2024). Enhanced accuracy estimation model energy import in on-grid rooftop solar photovoltaic. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, *14*(5), 5970–5983. https://doi.org/10.11591/ijece.v14i5.pp5970-5983

Sayyah, A., Horenstein, M. N., & Mazumder, M. K. (2014). Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels. *Solar Energy*, *107*, 576–604. https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.030

Sengupta, M., Xie, Y., Lopez, A., Habte, A., Maclaurin, G., & Shelby, J. (2018). The National Solar Radiation Data Base (NSRDB). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *89*(January 2018), 51–60. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.003

Sianturi, Y., Marjuki, & Sartika, K. (2020). Evaluation of ERA5 and MERRA2 reanalyses to estimate solar irradiance using ground observations over Indonesia region. *AIP Conference Proceedings*, *2223*(August). https://doi.org/10.1063/5.0000854

Soci, C., Hersbach, H., Simmons, A., Poli, P., Bell, B., Berrisford, P., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Radu, R., Schepers, D., Villaume, S., Haimberger, L., Woollen, J., Buontempo, C., & Thépaut, J. N. (2024). The ERA5 global reanalysis from 1940 to 2022. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *150*(764), 4014–4048. https://doi.org/10.1002/qj.4803

Stackhouse, P. W., Zhang, T., Westberg, D., Barnett, A. J., Bristow, T., Macpherson, B., & Hamilton, B. (2018). POWER release 8 (with CERES-EBAF edition 4.1) methodology (data parameters, sources, & validation). NASA Technical Report. https://power.larc.nasa.gov/

SUN Energy & Atap Surya. (2022). As plan drawing: Solar PV system Cianjur Arta Makmur 245,1 kWp (Drawing No. SUN-ON-2161-ME). Sun Energy Indonesia.

World Bank Group. (2024). Global Solar Atlas. World Bank Group / ESMAP. https://globalsolaratlas.info.

Yadav, D., Yadav, S. K., Varma, V., Khatoon, S., Singh, J., Singh, R. B., Hasnain, S. M. M., Paramasivam, P., & Tufa, M. A. (2025). Experimental analysis of elevated temperature and soiling loss on the rooftop PV modules performance under composite climatic conditions. *Scientific Reports*, *15*(1), 1–21. https://doi.org/10.1038/s41598-025-25846-z