ISSN (Online): 2686-5157 Volume 7, Number 2, April 2026

JURNAL INOVASI ILMU PENGETAHUAN DAN TEKNOLOGI (JIPTEK)

Simulasi Performansi Panel Surya Fleksibel pada Berbagai Kondisi Atap Bangunan Menggunakan Software SAM (System Advisor Model)

Nissa Adiarifia [1], Ruhama Sidqy [2], Muyassar Allam Suyuthi [3], Dimas Jayadi Muhaijir Rizki [4]

[1,2,4] Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pamulang, Jl. Surya Kencana No. 1, Tangerang Selatan, Indonesia

[3] Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Institut Teknologi Indonesia, Jl. Puspitek, Tangerang Selatan, Indonesia

E-mail : [1] dosen03078@unpam.ac.id, [2] dosen03191@unpam.ac.id, [3] muyassarallam@iti.ac.id, [4] dimasjmr362@gmail.com

Masuk: 20 Mei 2026 *Direvisi: 23 Mei 2026* *Disetujui: 25 Mei 2026*

Abstract: *Indonesia has enormous solar energy potential reaching 3,294 GW; however, the implementation of rooftop photovoltaic (PV) systems in Indonesia still faces various technical challenges, including roof structural limitations, variations in roof geometry, and the complexity of integrating systems into existing buildings. Flexible solar panels offer a promising alternative because of their lightweight properties, high flexibility, and adaptability to roof surfaces with structural constraints. Nevertheless, the technical performance of flexible PV modules is significantly influenced by roof orientation and tilt angle, which directly affect solar radiation absorption and system losses. This study aims to analyze the technical performance of flexible rooftop PV systems under various roof geometries using the System Advisor Model (SAM) software. The research employed a quantitative simulation-based approach utilizing Typical Meteorological Year (TMY) meteorological data from South Tangerang, Indonesia. The modeled system had a capacity of 3.6 kW DC using 300 W flexible PV modules and a 3 kW AC inverter. Simulation scenarios were conducted with roof tilt angles of 0°, 10°, 20°, and 30° under north-facing and south-facing orientations. The results indicate that the optimal configuration was achieved at a 10° north-facing orientation, generating 5,174 kWh annually with a 16.2% capacity factor.*

Keywords: *Flexible Rooftop PV, Flexible Solar Panel, Roof Geometry, System Advisor Model (SAM), Technical Performance, Solar Energy.*

Abstrak: Indonesia memiliki potensi energi surya yang sangat besar mencapai 3.294 GW, namun implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap di Indonesia masih menghadapi berbagai kendala teknis, seperti keterbatasan struktur atap, variasi geometri atap, serta kompleksitas integrasi sistem pada bangunan *eksisting*. Panel surya fleksibel menjadi alternatif yang menjanjikan karena memiliki bobot ringan, fleksibilitas tinggi, dan kemampuan adaptasi pada permukaan atap dengan keterbatasan struktural. Meskipun demikian, performa teknis modul surya fleksibel sangat dipengaruhi oleh orientasi dan sudut kemiringan atap yang berkaitan langsung dengan penerimaan radiasi matahari dan kerugian sistem. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa teknis PLTS atap fleksibel pada berbagai variasi geometri atap menggunakan perangkat lunak System Advisor Model (SAM). Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi dengan data meteorologi Typical Meteorological Year (TMY) wilayah Tangerang Selatan, Indonesia. Sistem yang dimodelkan memiliki kapasitas 3,6 kW DC menggunakan modul surya fleksibel 300 W dan inverter 3 kW AC. Variasi simulasi dilakukan pada sudut kemiringan 0°, 10°, 20°, dan 30° dengan orientasi utara dan selatan. Hasil penelitian menunjukkan konfigurasi optimal diperoleh pada orientasi utara dengan sudut kemiringan 10°, menghasilkan energi tahunan sebesar 5.174 kWh dan *capacity factor* sebesar 16,2%.

Kata kunci: PLTS Atap Fleksibel, Panel Surya Fleksibel, Geometri Atap, System Advisor Model (SAM), Performa Teknis, Energi Surya.

PENDAHULUAN

Indonesia memiliki potensi energi surya yang sangat besar dan sedang memasuki fase percepatan transisi energi menuju pemanfaatan energi baru terbarukan yang lebih masif. Hal ini ditunjukkan dengan meningkatnya kapasitas produksi industri panel surya nasional yang telah mencapai 14,6 GWp untuk modul surya dan 9,5 GW untuk sel surya per September 2025, serta target pemerintah dalam pengembangan sistem kelistrikan berbasis 100% energi terbarukan pada dekade mendatang [1]. Potensi energi terbarukan Indonesia mencapai lebih dari 3.600 GW dengan potensi energi surya lebih dari 3.200 GW, namun pemanfaatannya masih tergolong rendah yaitu sekitar 200 MW [2].

Salah satu implementasi energi surya yang berkembang pesat adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap karena mampu memanfaatkan bangunan *eksisting* tanpa membutuhkan tambahan lahan yang luas. Namun, performa sistem PLTS atap sangat dipengaruhi oleh konfigurasi geometri atap, terutama sudut kemiringan dan orientasi panel terhadap arah datang sinar matahari. Perbedaan sudut kemiringan dan arah hadap panel dapat memengaruhi intensitas radiasi matahari yang diterima, temperatur operasi modul, serta jumlah energi listrik yang dihasilkan [3], [4]. Selain itu, orientasi panel terhadap arah mata angin juga berpengaruh terhadap efektivitas penyerapan energi surya dan potensi gangguan akibat *partial shading* pada panel surya [3], [5].

Penelitian mengenai pengaruh variasi geometri atap terhadap performa PLTS di Indonesia masih relatif terbatas, khususnya yang menggunakan pendekatan simulasi berbasis data meteorologi lokal secara komprehensif. Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa sudut kemiringan optimal mampu meningkatkan daya keluaran panel surya secara signifikan. Ridho dkk. [6] menunjukkan bahwa sudut kemiringan 10° menghasilkan daya keluaran tertinggi sebesar 50,81 Watt pada pengujian panel 50 Wp di Samarinda. Penelitian Zakri dkk. [4] juga menunjukkan bahwa variasi sudut condong memengaruhi karakteristik arus dan tegangan panel surya akibat perubahan intensitas radiasi matahari.

Untuk mengatasi keterbatasan pengujian eksperimental, penggunaan perangkat lunak simulasi menjadi solusi yang lebih efisien dalam memodelkan performa sistem PLTS. Badogil dkk. [3] menggunakan perangkat lunak PVSyst dan menemukan bahwa kombinasi sudut kemiringan 10° dan azimut 50° menghasilkan *Performance Ratio* (PR) sebesar 73,2%. Selain itu, perangkat lunak System Advisor Model (SAM) yang dikembangkan oleh NREL dinilai mampu memodelkan performa teknis sekaligus aspek keekonomian sistem PLTS secara komprehensif. Penggunaan SAM telah dilakukan oleh Karim dkk. [7] untuk desain PLTS gedung kampus dan oleh Wardana dkk. [8] untuk simulasi sistem PLTS hibrida pada sektor komersial, sementara Parapa [9] memanfaatkan SAM untuk menganalisis dampak *shading* terhadap penurunan produksi energi pada PLTS skala besar. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis performa panel surya pada berbagai variasi sudut kemiringan dan arah hadap atap menggunakan perangkat lunak System Advisor Model (SAM) dengan data meteorologi wilayah Tangerang Selatan. Parameter yang dianalisis meliputi produksi energi tahunan, *capacity factor*, dan kerugian sistem (*system losses*), sehingga hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi teknis dalam optimasi desain geometri PLTS atap fleksibel di wilayah tropis Indonesia.

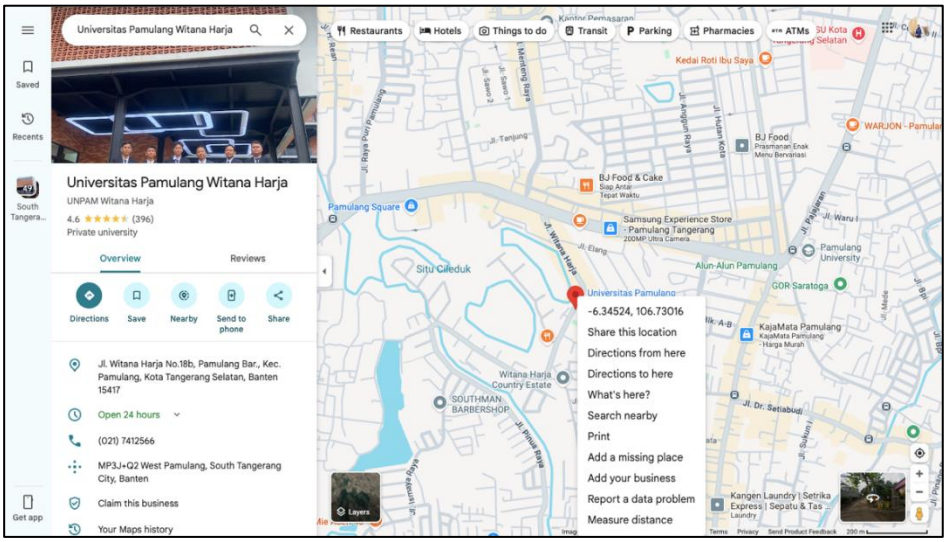
METODOLOGI

Metodologi penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi komputer menggunakan *software* System Advisor Model (SAM). Penelitian dilakukan dengan memodelkan sistem energi surya fotovoltaik secara virtual untuk memprediksi keluaran energi berdasarkan variabel geometri yang ditentukan. Proses simulasi dilakukan secara sistematis melalui lima tahapan utama, yang diawali dengan penentuan lokasi dan data meteorologi, dilanjut dengan pemodelan sistem PV, skenario variabel geometri atap, dan diakhiri dengan analisis dan ekstraksi data.

Penentuan Lokasi dan Pengumpulan Data Meteorologi

Tahap awal yang paling krusial dalam simulasi sistem PV (*photovoltaic*) adalah penentuan lokasi geografis yang akurat. Lokasi penelitian ditetapkan pada sebuah area di Tangerang Selatan, Indonesia.

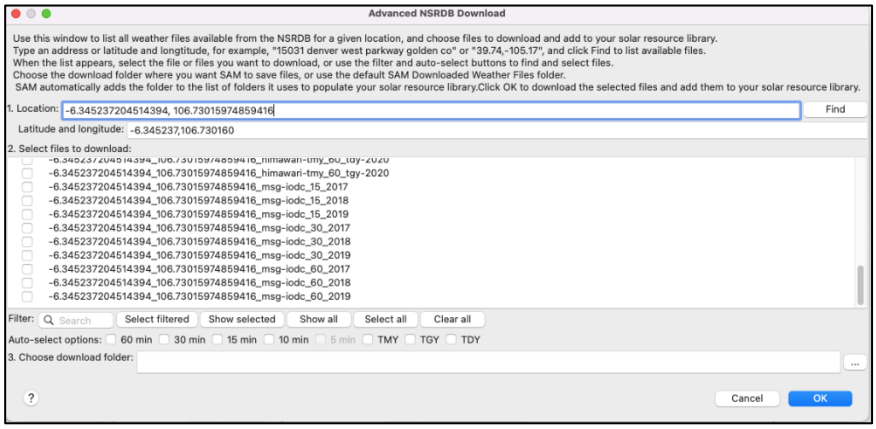
1. Penentuan Koordinat Geografis
   Lokasi ditentukan dengan menetapkan titik koordinat presisi (*latitude* dan *longitude*) (Gambar 1). Koordinat ini menjadi kunci utama bagi perangkat lunak untuk menghitung sudut datang sinar matahari (*angle of incidence*) yang berubah-ubah sepanjang tahun terhadap posisi bangunan.



Gambar 1. Penentuan koordinat geografis Universitas Pamulang Witana Harja (Sumber: Google Maps)

2. Integrasi Data Cuaca TMY

Koordinat tersebut dimasukkan ke dalam basis data System Advisor Model (SAM) untuk menarik data cuaca *Typical Meteorological Year* (TMY). Data TMY merupakan kompilasi data cuaca per jam yang mencakup periode jangka panjang (minimal 10 tahun) untuk memberikan representasi cuaca rata-rata yang paling mendekati kenyataan (Gambar 2).



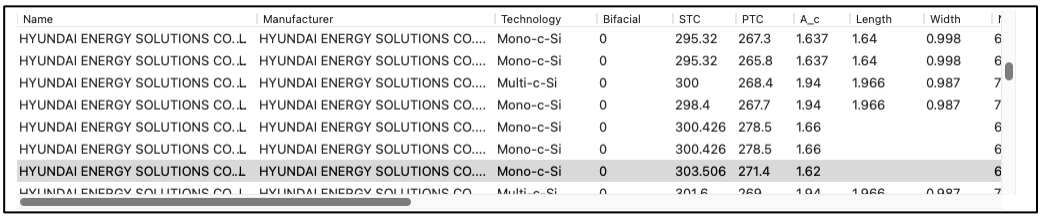
Gambar 2. Unduh data cuaca dari *database* SAM sesuai koordinat

Pemodelan Sistem PV

Pemodelan sistem dilakukan dengan mereplikasi sistem PLTS atap skala residensial dengan kapasitas total 3,6 kW DC. Pemilihan komponen dilakukan secara spesifik untuk mencerminkan teknologi panel surya fleksibel.

1. Spesifikasi Modul PV

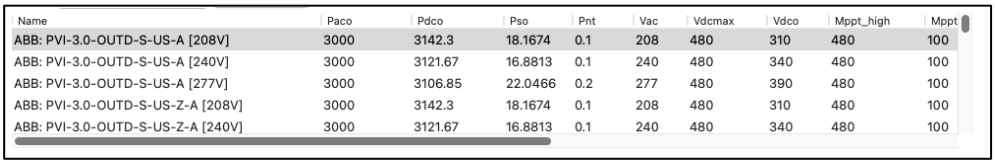
Penelitian ini menggunakan modul surya fleksibel dengan kapasitas daya 300 Watt pada kondisi uji standar *Standard Test Conditions* (STC). Modul fleksibel dipilih karena karakteristik bobotnya yang ringan dan profilnya yang tipis, sehingga memungkinkan pemasangan tanpa struktur penyangga besi (Gambar 3).



Name	Manufacturer	Technology	Bifacial	STC	PTC	A_c	Length	Width	
HYUNDAI ENERGY SOLUTIONS CO..L	HYUNDAI ENERGY SOLUTIONS CO....	Mono-c-Si	0	295.32	267.3	1.637	1.64	0.998	6
HYUNDAI ENERGY SOLUTIONS CO..L	HYUNDAI ENERGY SOLUTIONS CO....	Mono-c-Si	0	295.32	265.8	1.637	1.64	0.998	6
HYUNDAI ENERGY SOLUTIONS CO..L	HYUNDAI ENERGY SOLUTIONS CO....	Multi-c-Si	0	300	268.4	1.94	1.966	0.987	7
HYUNDAI ENERGY SOLUTIONS CO..L	HYUNDAI ENERGY SOLUTIONS CO....	Mono-c-Si	0	298.4	267.7	1.94	1.966	0.987	7
HYUNDAI ENERGY SOLUTIONS CO..L	HYUNDAI ENERGY SOLUTIONS CO....	Mono-c-Si	0	300.426	278.5	1.66			6
HYUNDAI ENERGY SOLUTIONS CO..L	HYUNDAI ENERGY SOLUTIONS CO....	Mono-c-Si	0	300.426	278.5	1.66			6
HYUNDAI ENERGY SOLUTIONS CO..L	HYUNDAI ENERGY SOLUTIONS CO....	Mono-c-Si	0	303.506	271.4	1.62			6

Gambar 3. Pemilihan modul sesuai kapasitas STC

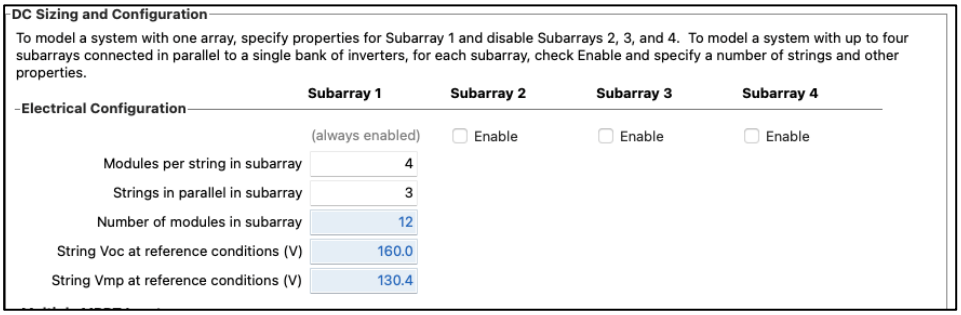
2. Spesifikasi Inverter
   Inverter yang digunakan masuk dalam kategori residensial dengan kapasitas 3 kW AC yang disesuaikan dengan P_{aco} atau *Maximum AC Power Output*. Pemilihan inverter ini memperhatikan efisiensi konversi daya dari arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) serta rentang tegangan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) (Gambar 4).



Name	Paco	Pdco	Pso	Pnt	Vac	Vdcmax	Vdco	Mppt_high	Mppt
ABB: PVI-3.0-OUTD-S-US-A [208V]	3000	3142.3	18.1674	0.1	208	480	310	480	100
ABB: PVI-3.0-OUTD-S-US-A [240V]	3000	3121.67	16.8813	0.1	240	480	340	480	100
ABB: PVI-3.0-OUTD-S-US-A [277V]	3000	3106.85	22.0466	0.2	277	480	390	480	100
ABB: PVI-3.0-OUTD-S-US-Z-A [208V]	3000	3142.3	18.1674	0.1	208	480	310	480	100
ABB: PVI-3.0-OUTD-S-US-Z-A [240V]	3000	3121.67	16.8813	0.1	240	480	340	480	100

Gambar 4. Pemilihan inverter sesuai kapasitas MPPT

3. Konfigurasi Rangkaian (*Stringing*)
   Untuk memastikan sistem bekerja optimal, 12 unit modul disusun ke dalam konfigurasi kelistrikan tertentu. Modul dibagi ke dalam 3 rangkaian paralel (*string*), di mana setiap *string* terdiri dari 4 modul yang disusun secara seri. Konfigurasi ini dirancang agar tegangan total dari rangkaian modul tetap berada di dalam jendela operasional MPPT inverter, sehingga kerugian energi akibat ketidaksesuaian (*mismatch*) tegangan dapat diminimalkan (Gambar 5).



Gambar 5. Konfigurasi rangkaian modul yang digunakan

Skenario Variabel Geometri Atap

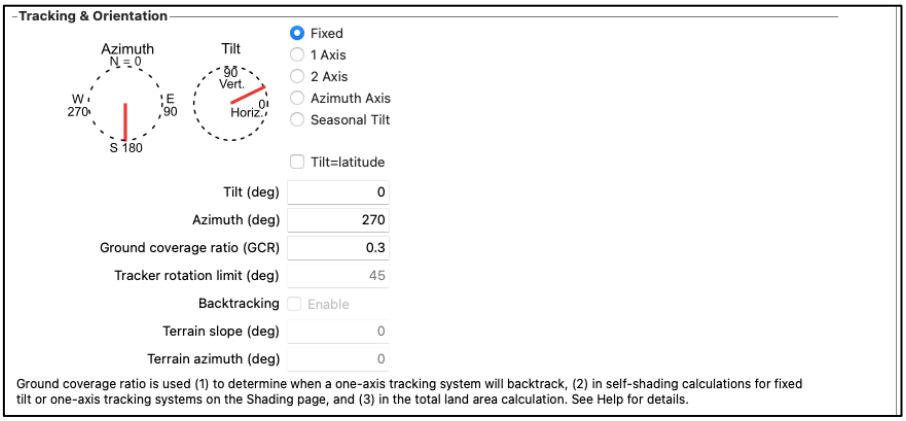
Penelitian ini memiliki variabel bebas, terkontrol, dan terikat. Rincian dari ketiga variabel tersebut dapat dilihat pada Tabel 1. Namun, inti dari penelitian ini adalah pengujian variabel geometri atap bangunan terhadap performa panel. Simulasi dijalankan berulang kali dengan mengubah parameter posisi panel pada tab desain sistem seperti pada Tabel 2 dan Gambar 6.

Tabel 1. Matriks variasi variabel penelitian

Kategori Variabel	Parameter Teknis	Nilai / Spesifikasi
Variabel Bebas	1. Sudut Kemiringan (*Tilt*)	0°, 10°, 20°, dan 30°
(Geometri Atap)	2. Arah Hadap (*Azimuth*)	Utara (0°) dan Selatan (180°)
Variabel Terkontrol	1. Lokasi Geografis	Tangerang Selatan, Indonesia (Data TMY)
(Sistem & Lokasi)	2. Kapasitas Sistem DC	3642,072 W DC (≈3,6 kW DC)
	3. Jenis Panel Surya	Monokristalin Fleksibel (303,506 W (≈ 300 W)
	4. Kapasitas Inverter	3 kW AC
	5. Metode Pemasangan	*Flush-mount* (Menempel Atap)
Variabel Terikat	1. Produksi Energi Tahunan	Total kWh per tahun
(Output Simulasi)	2. Faktor Kapasitas	Persentase (%)
	3. Diagram Kerugian Sistem	Persentase kehilangan energi (*system losses*) (%)

Tabel 2. Daftar skenario pengujian pada *Software* SAM

ID Skenario	Arah Hadap (*Azimuth*)	Sudut Kemiringan (*Tilt*)	Tujuan Analisis
A1	Utara (0°)	0° (Datar)	*Baseline* performa pada atap datar.
A2	Utara (0°)	10°	Pengaruh kemiringan landai arah Utara.
A3	Utara (0°)	20°	Pengaruh kemiringan standar arah Utara.
A4	Utara (0°)	30°	Pengaruh kemiringan curam arah Utara.
B1	Selatan (180°)	0° (Datar)	Hasil akan sama dengan A1 (sebagai kontrol).
B2	Selatan (180°)	10°	Pengaruh kemiringan landai arah Selatan.
B3	Selatan (180°)	20°	Pengaruh kemiringan standar arah Selatan.
B4	Selatan (180°)	30°	Pengaruh kemiringan curam arah Selatan.



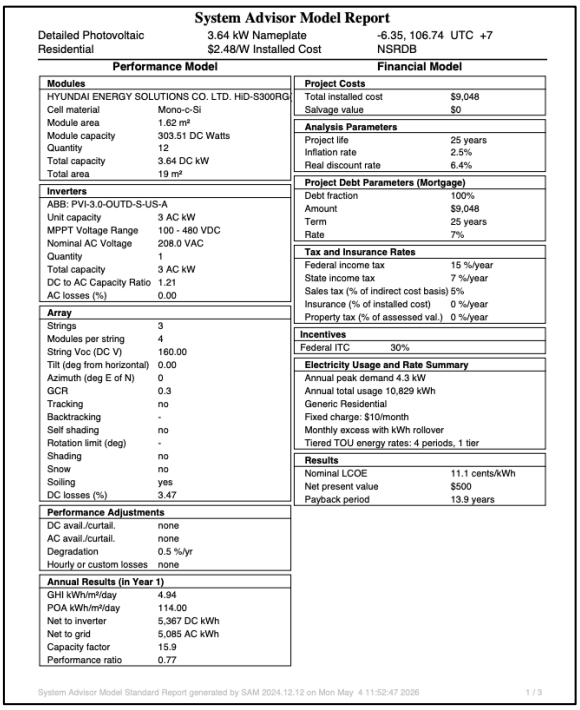
Gambar 6. Konfigurasi *tilt* dan *azimuth* per skenario

1. Variasi Arah Hadap (*Azimuth*)
   Penelitian membandikan dua orientasi utama bangunan yang umum ditemukan di Indonesia:
   - Arah Utara (*Azimuth* 0°)
     Mensimulasikan panel yang menghadap ke arah khatulistiwa dari belahan bumi selatan.
   - Arah Selatan (*Azimuth* 180°)
     Mensimulasikan panel yang menghadap ke arah sebaliknya untuk melihat penurunan produktivitas akibat efek posisi matahari tahunan.

2. Variasi Sudut Kemiringan (*Tilt*)
   Karena panel fleksibel terpasang mengikuti kemiringan atap, maka diuji tiga jenis kemiringan yang merepresentasikan tipologi atap di Indonesia:
   - Sudut 0° : Merepresentasikan atap dak beton atau permukaan datar.
   - Sudut 10° : Merepresentasikan atap landai.
   - Sudut 20° : Merepresentasikan atap miring standar perumahan.
   - Sudut 30° : Merepresentasikan atap miring cukup curam.

Tahapan Analisis dan Ekstraksi Data

Setelah seluruh model komponen dan skenario geometri diatur, proses eksekusi simulasi dijalankan untuk memproses data radiasi per jam selama 8.760 jam (24 jam/hari × 365 hari) dalam satu tahun. Contoh salah satu hasil laporan (*report*) simulasi dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Laporan (*report*) hasil simulasi (contoh)

1. Eksekusi Simulasi
   Perangkat lunak melakukan kalkulasi teknis yang kompleks, termasuk menghitung *self-shading*, kerugian termal modul, dan efisiensi *clipping* pada inverter.
2. Pencatatan Parameter Keluaran (*Output*)
   Hasil dari setiap iterasi simulasi diekstraksi secara manual ke dalam instrumen pencatatan data. Parameter utama yang diambil meliputi:
   - Produksi Energi Tahunan: Total kWh yang dihasilkan sistem selama satu tahun.
   - Faktor Kapasitas: Persentase efektivitas pemanfaatan kapasitas terpasang sistem.
   - Analisis Diagram Kerugian Sistem**:** Menggunakan fitur pelaporan mendalam untuk membedah titik kehilangan energi (*losses*) terbesar, baik akibat sudut datang matahari yang tidak optimal, kerugian akibat kenaikan suhu pada sel, maupun kerugian pada tahap konversi daya.

Instrumen Pengolahan Data

Data yang telah dikumpulkan kemudian diolah menggunakan teknik analisis komparatif deskriptif melalui tiga pendekatan utama.

1. Tabel Perbandingan
   Membuat tabel matriks yang menyandingkan hasil produksi energi tahunan dan faktor kapasitas dari setiap skenario geometri. Hal ini mempermudah identifikasi tren penurunan atau kenaikan performa.
2. Analisis Fenomena
   Peneliti akan menghubungkan hasil angka simulasi dengan posisi lintasan matahari (analisis geometri surya) untuk menjelaskan secara ilmiah alasan sudut atau arah tertentu menghasilkan energi yang lebih tinggi.
3. Kesimpulan Teknis
   Hasil akhir dari pengolahan data ini berupa rekomendasi teknis mengenai konfigurasi geometri atap yang paling ideal untuk pemasangan panel surya fleksibel di wilayah Tangerang Selatan guna mencapai efisiensi energi yang maksimal tanpa harus melakukan modifikasi struktur bangunan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari penelitian ini menyajikan data teknis simulasi menggunakan perangkat lunak *System Advisor Model* (SAM) terhadap berbagai skenario geometri atap di wilayah Tangerang Selatan. Fokus utama dalam pemaparan hasil ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh variasi sudut kemiringan (*tilt*) dan arah hadap (*azimuth*) terhadap efektivitas penyerapan radiasi matahari pada panel surya fleksibel berkapasitas 3,6 kW DC. Data yang disajikan merupakan hasil ekstraksi parameter performa murni yang meliputi produksi energi tahunan, faktor kapasitas, serta identifikasi hambatan teknis melalui diagram kerugian sistem (*system losses*). Melalui perbandingan antar-skenario ini, dianalisis korelasi antara posisi lintasan matahari tahunan dengan desain arsitektur atap guna menentukan konfigurasi yang paling optimal untuk menghasilkan energi maksimal tanpa mengandalkan penyesuaian struktur mekanis tambahan.

Hasil Simulasi Produksi Energi Tahunan

Sub-bab ini menyajikan data akumulasi energi listrik arus bolak-balik (AC) tahunan yang dihasilkan oleh sistem PLTS atap berkapasitas 3,6 kW DC (3.642,072 W DC) selama satu tahun kalender operasional secara penuh di wilayah Tangerang Selatan. Penyajian data ini bertujuan untuk memetakan fluktuasi *output* energi yang terjadi akibat perubahan geometri atap. Dalam penelitian ini, konfigurasi atap datar dengan sudut kemiringan 0° digunakan sebagai kondisi dasar (*baseline*) untuk membandingkan perubahan performa energi akibat variasi sudut kemiringan panel, baik yang menghadap ke arah utara maupun selatan. Ringkasan hasil produksi energi tahunan pada masing-masing skenario ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Ringkasan *output* produksi energi tahunan

ID Skenario	Arah Hadap (*Azimuth*)	Sudut Kemiringan (*Tilt*)	Produksi Energi Tahunan (kWh)
A1	Utara (0°)	0°	5.085
A2	Utara (0°)	10°	5.174
A3	Utara (0°)	20°	5.142
A4	Utara (0°)	30°	4.993
B1	Selatan (180°)	0°	5.085
B2	Selatan (180°)	10°	4.945
B3	Selatan (180°)	20°	4.686
B4	Selatan (180°)	30°	4.315

Berdasarkan hasil simulasi pada Tabel 3, terlihat bahwa variasi arah hadap dan sudut kemiringan panel memberikan pengaruh yang signifikan terhadap produksi energi tahunan sistem PLTS atap. Pada kelompok skenario dengan arah hadap utara (A), produksi energi tertinggi diperoleh pada skenario A2 dengan sudut kemiringan 10°, yaitu sebesar 5.174 kWh. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan kondisi dasar (A1) yang menghasilkan 5.085 kWh. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan sudut kemiringan sebesar 10° mampu meningkatkan penerimaan radiasi matahari pada permukaan panel sehingga konversi energi menjadi lebih optimal.

Namun demikian, ketika sudut kemiringan ditingkatkan menjadi 20° dan 30°, produksi energi mulai mengalami penurunan, masing-masing menjadi 5.142 kWh dan 4.993 kWh. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sudut kemiringan yang terlalu besar pada orientasi utara menyebabkan penurunan intensitas radiasi efektif yang diterima panel sepanjang tahun, sehingga energi yang dihasilkan menjadi lebih rendah dibandingkan sudut optimalnya.

Sementara itu, pada kelompok skenario dengan arah hadap selatan (B), tren penurunan produksi energi terlihat lebih signifikan seiring bertambahnya sudut kemiringan panel. Produksi energi pada skenario B1 dengan sudut 0° bernilai sama dengan kondisi dasar (A1), yaitu 5.085 kWh. Akan tetapi, pada kemiringan 10°, 20°, dan 30°, produksi energi secara berturut-turut turun menjadi 4.945 kWh, 4.686 kWh, dan 4.315 kWh. Penurunan ini menunjukkan bahwa orientasi selatan kurang sesuai untuk kondisi geografis lokasi penelitian, sehingga peningkatan sudut kemiringan justru memperbesar kehilangan potensi penerimaan radiasi matahari.

Secara umum, hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi paling optimal untuk sistem PLTS atap fleksibel di wilayah Tangerang Selatan adalah arah hadap utara dengan sudut kemiringan 10°. Konfigurasi tersebut menghasilkan produksi energi tahunan tertinggi dibandingkan skenario lainnya. Temuan ini menegaskan bahwa pemilihan kombinasi *azimuth* dan *tilt* merupakan faktor krusial dalam optimasi performa PLTS atap, khususnya pada daerah beriklim tropis dengan karakteristik lintasan matahari yang spesifik sepanjang tahun.

Analisis Faktor Kapasitas terhadap Variasi Geometri

Sub-bab ini menyajikan analisis kinerja sistem PLTS atap berdasarkan parameter *Capacity Factor* (CF) atau faktor kapasitas. Parameter ini digunakan untuk menggambarkan tingkat efektivitas sistem dalam mengonversi potensi energi surya menjadi energi listrik aktual dibandingkan dengan kapasitas nominal terpasang sebesar 3,6 kW DC (3.642,072 W DC). Faktor kapasitas merupakan salah satu indikator teknis utama dalam evaluasi performa PLTS karena mampu merepresentasikan tingkat produktivitas sistem secara aktual selama periode operasi tahunan. Semakin tinggi nilai faktor kapasitas, maka semakin optimal pula kemampuan sistem dalam memanfaatkan sumber radiasi matahari yang tersedia pada lokasi penelitian.

Evaluasi faktor kapasitas pada penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi arah hadap (*azimuth*) dan sudut kemiringan (*tilt*) terhadap efisiensi operasional sistem PLTS atap fleksibel di wilayah Tangerang Selatan. Penggunaan modul surya fleksibel dengan metode pemasangan *flush-mount* menyebabkan panel mengikuti geometri permukaan atap tanpa struktur penyesuaian sudut tambahan, sehingga performa sistem sangat dipengaruhi oleh karakteristik desain atap bangunan. Dalam kondisi tersebut, faktor kapasitas menjadi parameter yang penting untuk menilai kesesuaian konfigurasi geometris atap terhadap lintasan matahari harian maupun tahunan. Nilai faktor kapasitas yang diperoleh dari setiap skenario simulasi disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan faktor kapasitas sistem

ID Skenario	Arah Hadap (*Azimuth*)	Sudut Kemiringan (*Tilt*)	Faktor Kapasitas (%)	Keterangan Efisiensi
A1	Utara (0°)	0°	15,9	Sedang
A2	Utara (0°)	10°	16,2	Tinggi
A3	Utara (0°)	20°	16,1	Tinggi
A4	Utara (0°)	30°	15,7	Sedang
B1	Selatan (180°)	0°	15,9	Sedang
B2	Selatan (180°)	10°	15,5	Sedang
B3	Selatan (180°)	20°	14,7	Rendah
B4	Selatan (180°)	30°	13,5	Rendah

Berdasarkan hasil simulasi pada Tabel 4, terlihat bahwa variasi orientasi dan sudut kemiringan panel memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai faktor kapasitas sistem PLTS atap. Pada kelompok skenario dengan orientasi utara (A), peningkatan sudut kemiringan dari 0° menjadi 10° menghasilkan kenaikan faktor kapasitas dari 15,9% menjadi 16,2%. Nilai tersebut merupakan capaian tertinggi di antara seluruh konfigurasi yang diuji, yang menunjukkan bahwa kemiringan 10° pada orientasi utara mampu meningkatkan penerimaan radiasi matahari secara lebih optimal sepanjang tahun. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sudut datang radiasi matahari terhadap permukaan modul berada pada kondisi yang lebih mendekati optimum sehingga proses konversi energi berlangsung lebih efektif.

Pada skenario A3 dengan sudut kemiringan 20°, nilai faktor kapasitas masih berada pada kategori tinggi dengan nilai 16,1%, meskipun mengalami sedikit penurunan dibandingkan dengan A2. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan sudut kemiringan hingga 20° masih mampu mempertahankan performa sistem pada tingkat yang relatif baik. Namun, ketika sudut kemiringan ditingkatkan menjadi 30° pada skenario A4, nilai faktor kapasitas menurun menjadi 15,7%. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa sudut kemiringan yang terlalu besar mulai mengurangi efektivitas penerimaan radiasi matahari tahunan pada orientasi utara, sehingga energi listrik yang dihasilkan menjadi lebih rendah dibandingkan dengan konfigurasi optimum.

Berbeda dengan kelompok orientasi utara, seluruh skenario dengan orientasi selatan (B) menunjukkan kecenderungan penurunan faktor kapasitas seiring dengan bertambahnya sudut kemiringan panel. Pada skenario B1 dengan sudut kemiringan 0°, nilai faktor kapasitas masih mencapai 15,9%, setara dengan kondisi dasar pada orientasi utara. Akan tetapi, peningkatan sudut kemiringan menjadi 10°, 20°, dan 30° menyebabkan penurunan faktor kapasitas secara berturut-turut menjadi 15,5%, 14,7%, dan 13,5%. Penurunan yang cukup signifikan pada skenario B3 dan B4 menunjukkan bahwa kombinasi orientasi selatan dan sudut kemiringan tinggi kurang sesuai untuk kondisi geografis lokasi penelitian. Kondisi tersebut menyebabkan intensitas radiasi efektif yang diterima modul menjadi lebih rendah sehingga produktivitas sistem menurun secara nyata.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa konfigurasi arah hadap utara dengan sudut kemiringan rendah hingga sedang memberikan performa sistem yang lebih optimal dibandingkan dengan orientasi selatan. Skenario A2 menjadi konfigurasi terbaik karena menghasilkan nilai faktor kapasitas tertinggi sebesar 16,2%, yang menandakan tingkat pemanfaatan kapasitas sistem paling efisien terhadap potensi energi surya lokal. Temuan ini memperlihatkan bahwa optimasi geometri atap, khususnya kombinasi antara orientasi dan sudut kemiringan, memiliki peranan yang sangat penting dalam meningkatkan performa PLTS atap fleksibel pada bangunan dengan sistem pemasangan *flush-mount* di wilayah beriklim tropis seperti Tangerang Selatan.

Analisis Diagram Kerugian Sistem

Sub-bab ini membahas analisis kerugian energi (*system losses*) yang terjadi pada sistem PLTS atap berdasarkan hasil simulasi pada perangkat lunak *System Advisor Model* (SAM). Analisis dilakukan dengan mengekstraksi data dari *System Loss Diagram* atau *Waterfall Chart* untuk mengidentifikasi faktor-faktor teknis yang menyebabkan penurunan energi dari kondisi teoritis ideal menuju kondisi operasional aktual di lapangan. Pendekatan ini penting dilakukan karena performa sistem PLTS tidak hanya dipengaruhi oleh kapasitas terpasang dan intensitas radiasi matahari, tetapi juga oleh berbagai mekanisme kehilangan energi yang terjadi selama proses konversi berlangsung.

Pada sistem PLTS yang menggunakan panel surya fleksibel, kerugian energi dipengaruhi secara signifikan oleh metode pemasangan *flush-mount* yang membuat modul menempel langsung pada permukaan atap tanpa rongga udara pendingin. Kondisi tersebut menyebabkan peningkatan temperatur operasi modul yang berdampak pada penurunan efisiensi konversi energi listrik. Selain itu, variasi geometri atap juga memengaruhi besar kecilnya kerugian sudut datang cahaya atau *Incidence Angle Modifier* (IAM), yaitu kehilangan energi akibat sudut datang radiasi matahari yang tidak tegak lurus terhadap permukaan panel. Oleh karena itu, analisis terhadap kedua parameter tersebut menjadi penting untuk memahami batasan teknis performa sistem pada setiap konfigurasi skenario yang diuji. Rincian nilai kerugian utama sistem pada masing-masing skenario ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perincian kerugian sistem terbesar per skenario

ID Skenario	Kerugian Sudut Datang / IAM (%)	Kerugian Termal / NOCT (%)	Efisiensi Sistem ke Jaringan (*Net AC to Grid*)
A1 (Datar)	2,315	8,708	85,485%
A2 (Utara 10°)	1,991	8,886	85,465%
A3 (Utara 20°)	1,826	8,917	85,445%
A4 (Utara 30°)	1,762	8,801	85,419%
B1 (Datar)	2,315	8,708	85,485%
B2 (Selatan 10°)	2,143	8,508	85,425%
B3 (Selatan 20°)	2,175	8,194	85,382%
B4 (Selatan 30°)	2,438	7,801	85,361%

Berdasarkan hasil simulasi pada Tabel 5, terlihat bahwa kerugian termal merupakan komponen kehilangan energi terbesar pada seluruh skenario dibandingkan dengan kerugian sudut datang cahaya (IAM). Nilai kerugian termal berada pada rentang 7,801% hingga 8,917%, yang menunjukkan bahwa temperatur operasi modul memberikan dampak signifikan terhadap penurunan performa sistem PLTS fleksibel. Tingginya kerugian termal tersebut berkaitan dengan karakteristik pemasangan *flush-mount* yang membatasi sirkulasi udara di bawah modul sehingga pelepasan panas menjadi kurang optimal. Akibatnya, temperatur sel surya meningkat dan efisiensi konversi energi listrik menurun.

Pada kelompok skenario arah utara (A), terlihat bahwa peningkatan sudut kemiringan menyebabkan nilai kerugian IAM mengalami penurunan secara bertahap dari 2,315% pada kondisi datar menjadi 1,762% pada kemiringan 30°. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan sudut kemiringan pada orientasi utara mampu memperbaiki sudut datang radiasi matahari terhadap permukaan modul sehingga refleksi cahaya yang hilang menjadi lebih kecil. Namun demikian, meskipun kerugian IAM menurun, kerugian termal justru mengalami sedikit peningkatan pada skenario A2 dan A3 hingga mencapai 8,917%. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan sudut kemiringan belum mampu mengurangi akumulasi panas secara signifikan akibat keterbatasan ventilasi pada sistem pemasangan panel fleksibel.

Pada kelompok skenario arah selatan (B), tren yang berbeda terlihat pada nilai kerugian IAM. Seiring dengan bertambahnya sudut kemiringan, nilai IAM cenderung meningkat dari 2,315% pada kondisi datar menjadi 2,438% pada kemiringan 30°. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa orientasi selatan menyebabkan sudut datang radiasi matahari menjadi kurang optimal sehingga kehilangan energi akibat refleksi cahaya semakin besar pada sudut kemiringan tinggi. Sementara itu, kerugian termal pada kelompok selatan justru mengalami penurunan bertahap hingga mencapai 7,801% pada skenario B4. Penurunan ini mengindikasikan bahwa perubahan orientasi dan sudut kemiringan tertentu dapat membantu mengurangi akumulasi panas pada permukaan modul, meskipun secara keseluruhan produktivitas energi tetap lebih rendah dibandingkan dengan orientasi utara.

Nilai *Net AC to Grid* pada seluruh skenario berada pada kisaran 85,361% hingga 85,485%, yang menunjukkan bahwa sebagian besar energi hasil konversi masih dapat disalurkan ke jaringan listrik meskipun sistem mengalami berbagai bentuk kehilangan energi internal. Perbedaan nilai yang relatif kecil antar-skenario mengindikasikan bahwa perubahan orientasi dan sudut kemiringan lebih dominan memengaruhi distribusi jenis kerugian energi dibandingkan dengan total kehilangan energi keseluruhan.

Secara umum, hasil analisis menunjukkan bahwa sistem PLTS atap fleksibel memiliki tantangan utama pada aspek kerugian termal akibat metode pemasangan *flush-mount*, sementara kerugian IAM sangat dipengaruhi oleh kombinasi orientasi dan sudut kemiringan panel. Konfigurasi arah utara dengan sudut kemiringan rendah hingga sedang menunjukkan keseimbangan yang lebih baik antara minimisasi kerugian sudut datang cahaya dan performa produksi energi tahunan, sehingga lebih sesuai diterapkan pada kondisi geografis Tangerang Selatan.

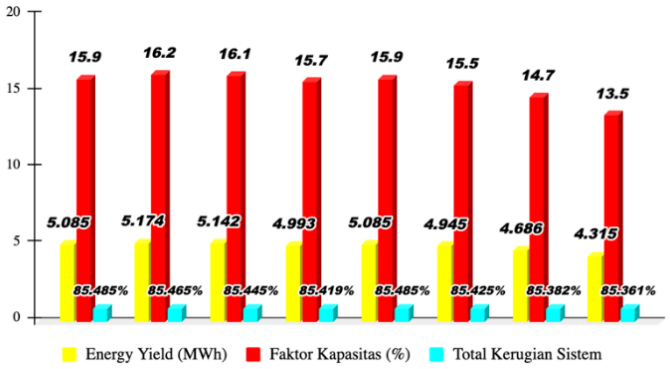
Pembahasan Komparatif dan Geometri Surya

Sub-bab ini merupakan sintesis akhir dari seluruh hasil simulasi yang telah dilakukan menggunakan perangkat lunak *System Advisor Model* (SAM). Pada bagian ini, seluruh parameter performa sistem, meliputi produksi energi tahunan, faktor kapasitas, dan kerugian sistem (*system losses*), dianalisis secara terpadu untuk menentukan konfigurasi geometri atap yang paling optimal bagi penerapan PLTS atap fleksibel di wilayah Tangerang Selatan. Pembahasan dilakukan dengan menghubungkan hasil simulasi terhadap teori geometri surya, khususnya karakteristik lintasan semu matahari tahunan pada wilayah tropis yang berada di sekitar garis khatulistiwa.

Secara geografis, wilayah Tangerang Selatan berada pada lintang selatan dengan karakteristik posisi matahari yang mengalami pergeseran tahunan dari belahan utara ke belahan selatan bumi. Dalam sebagian besar periode tahunan, posisi matahari relatif lebih dominan berada di sisi utara terhadap lokasi penelitian. Kondisi tersebut menyebabkan orientasi panel ke arah utara memiliki potensi penerimaan radiasi matahari yang lebih tinggi dibandingkan dengan orientasi selatan, terutama pada jam-jam efektif penyinaran harian. Selain faktor orientasi, sudut kemiringan panel juga berpengaruh terhadap besar kecilnya sudut datang radiasi matahari yang diterima permukaan modul. Semakin mendekati kondisi tegak lurus terhadap arah datang radiasi dominan tahunan, maka semakin besar energi surya yang dapat dikonversi menjadi energi listrik. Ringkasan keseluruhan hasil simulasi ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Ringkasan parameter performa keseluruhan sistem PLTS atap

ID Skenario	Arah Hadap (*Azimuth*)	Sudut (*Tilt*)	Produksi Energi Tahunan (kWh)	Faktor Kapasitas (%)	Efisiensi *Net AC to Grid*
A1	Utara (0°)	0°	5.085	15,9	85,485%
A2	Utara (0°)	10°	5.174	16,2	85,465%
A3	Utara (0°)	20°	5.142	16,1	85,445%
A4	Utara (0°)	30°	4.993	15,7	85,419%
B1	Selatan (180°)	0°	5.085	15,9	85,485%
B2	Selatan (180°)	10°	4.945	15,5	85,425%
B3	Selatan (180°)	20°	4.686	14,7	85,382%
B4	Selatan (180°)	30°	4.315	13,5	85,361%



Gambar 8. Hasil performa simulasi PV seluruh skenario

Berdasarkan hasil pada Gambar 8 dan Tabel 6, terlihat bahwa konfigurasi orientasi utara dengan sudut kemiringan rendah hingga sedang memberikan performa sistem yang lebih baik dibandingkan dengan orientasi selatan. Skenario A2 menghasilkan produksi energi tahunan tertinggi sebesar 5.174 kWh dengan faktor kapasitas sebesar 16,2%, sehingga menjadi konfigurasi terbaik di antara seluruh skenario yang diuji. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sudut kemiringan 10° mampu memberikan kondisi penerimaan radiasi yang paling optimal terhadap lintasan matahari tahunan di lokasi penelitian. Pada sudut tersebut, permukaan panel memiliki sudut datang cahaya yang lebih mendekati kondisi normal terhadap radiasi dominan sehingga kehilangan energi akibat refleksi cahaya dapat ditekan tanpa meningkatkan kerugian geometris secara signifikan.

Meskipun skenario A3 dengan sudut kemiringan 20° masih menunjukkan performa yang relatif tinggi, terjadi sedikit penurunan produksi energi dan faktor kapasitas dibandingkan dengan A2. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan sudut kemiringan di atas kondisi optimum mulai mengurangi durasi penerimaan radiasi efektif tahunan pada permukaan panel. Penurunan performa menjadi semakin jelas pada skenario A4 dengan kemiringan 30°, yang menunjukkan bahwa sudut kemiringan tinggi kurang sesuai untuk sistem PLTS fleksibel statis pada lokasi penelitian.

Sebaliknya, seluruh konfigurasi dengan orientasi selatan memperlihatkan tren penurunan performa seiring dengan bertambahnya sudut kemiringan panel. Skenario B4 menjadi konfigurasi dengan performa terendah, yaitu menghasilkan produksi energi sebesar 4.315 kWh dengan faktor kapasitas hanya 13,5%. Penurunan tersebut disebabkan oleh posisi matahari yang relatif lebih sering berada di sisi utara terhadap lokasi penelitian, sehingga panel yang menghadap selatan menerima radiasi langsung dalam jumlah yang lebih rendah. Ketika sudut kemiringan diperbesar, sudut datang radiasi menjadi semakin tidak optimal sehingga kerugian akibat refleksi dan kehilangan geometris meningkat secara signifikan.

Selain aspek produksi energi, nilai efisiensi sistem (*Net AC to Grid*) pada seluruh skenario menunjukkan perbedaan yang relatif kecil, yaitu berada pada rentang 85,361% hingga 85,485%. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan konfigurasi geometri atap lebih berpengaruh terhadap efektivitas penerimaan radiasi matahari dibandingkan terhadap total efisiensi konversi sistem secara keseluruhan. Dengan demikian, optimasi orientasi dan sudut kemiringan menjadi faktor utama dalam meningkatkan performa PLTS atap fleksibel dibandingkan dengan hanya berfokus pada pengurangan kerugian sistem internal. Sebagai hasil akhir sintesis penelitian, konfigurasi geometri terbaik ditampilkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Matriks rekomendasi konfigurasi geometri optimal

Variabel	Konfigurasi Terpilih	Hasil Analisis Geometri Surya
Arah hadap terbaik	Utara	Posisi matahari lebih dominan berada di utara khatulistiwa pada lokasi Tangerang Selatan.
Sudut kemiringan terbaik	10°	Sudut yang paling mendekati tegak lurus terhadap radiasi puncak tahunan.
Potensi maksimal	5.174 kWh	Nilai produksi tertinggi yang bisa dicapai struktur atap *eksisting*.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi orientasi utara dengan sudut kemiringan 10° merupakan desain geometri paling optimal untuk penerapan PLTS atap fleksibel di wilayah Tangerang Selatan. Temuan ini memperlihatkan bahwa pendekatan optimasi geometri atap memiliki pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan performa energi sistem PLTS, khususnya pada modul fleksibel dengan metode pemasangan *flush-mount* yang tidak memungkinkan penyesuaian sudut panel secara dinamis. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi teknis dalam perancangan bangunan ramah energi berbasis PLTS atap di wilayah tropis dengan karakteristik lintasan matahari serupa.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan *software System Advisor Model* (SAM), variasi arah hadap (*azimuth*) dan sudut kemiringan atap (*tilt*) berpengaruh signifikan terhadap performa sistem PLTS atap di wilayah Tangerang Selatan. Parameter geometri atap memengaruhi produksi energi tahunan (*annual energy yield*), nilai faktor kapasitas (*capacity factor*), serta distribusi kerugian sistem (*system losses*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi optimal diperoleh pada orientasi utara dengan sudut kemiringan 10° yang menghasilkan produksi energi tahunan sebesar 5.174 kWh dan faktor kapasitas sebesar 16,2%. Sebaliknya, peningkatan sudut kemiringan hingga 30° menyebabkan penurunan performa sistem, terutama pada orientasi selatan. Analisis diagram kerugian sistem menunjukkan bahwa kerugian termal dan kerugian sudut datang cahaya (*Incidence Angle Modifier*/IAM) menjadi faktor utama yang memengaruhi efisiensi sistem. Secara keseluruhan, orientasi utara dengan sudut kemiringan rendah hingga sedang merupakan konfigurasi yang paling optimal untuk penerapan sistem PLTS atap di wilayah Tangerang Selatan.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan validasi eksperimental secara langsung guna membandingkan hasil simulasi dengan kondisi operasional aktual sistem PLTS atap. Selain itu, penelitian dapat dikembangkan dengan mempertimbangkan faktor ventilasi panel, material atap, efek bayangan (*shading*), serta analisis ekonomi seperti *Levelized Cost of Energy* (LCOE) dan *payback period*. Dalam penerapan praktis, perancangan orientasi bangunan dan sudut kemiringan atap perlu mempertimbangkan karakteristik lintasan matahari lokal agar performa sistem PLTS dapat lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Institute for Essential Services Reform, “Indonesia Solar Outlook 2024,” Jakarta, Indonesia, 2024.
[2] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, “Capaian Kinerja Sektor ESDM Tahun 2023 dan Rencana Kerja Tahun 2024,” Jakarta, Indonesia, 2023.
[3] H. T. Badogil, A. Dani, and D. Erivianto, “Studi Optimalisasi Sudut Kemiringan dan Azimut Panel Surya Terhadap Output PLTS Menggunakan Perangkat Lunak PVSyst,” *Innov. J. Soc. Sci. Res.*, vol. 4, no. 6, pp. 83–95, Nov. 2024.
[4] A. A. Zakri, I. H. Rosma, and D. P. H. Simanullang, “Effect Of Solar Radiation On Module Photovoltaics 100 Wp With Variation of Module Slope Angle,” *Indones. J. Electr. Eng. Informatics*, vol. 6, no. 1, pp. 45–52, 2018, doi: http://dx.doi.org/10.52549/ijeei.v6i1.351.
[5] H. Oufettoul, N. Lamdihine, S. Motahhir, N. Lamrini, I. A. Abdelmoula, and G. Aniba, “Comparative Performance Analysis of PV Module Positions in a Solar PV Array Under Partial Shading Conditions,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 12176–12194, 2023, doi: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3237250.
[6] D. A. R. Ridho, Rusda, and M. A. Putra, “Analisis Pengaruh Sudut Kemiringan Terhadap Penerimaan Iradiasi Matahari Dan Daya Keluaran Yang Dihasilkan Panel Surya,” *PoliGrid*, vol. 4, no. 1, pp. 25–31, 2023, doi: https://doi.org/10.46964/poligrid.v4i1.18.
[7] M. Y. Karim, P. A. Topan, D. Maulidyawati, and I. Darmawan, “Simulasi Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Menggunakan Software System Advisor Model (SAM) di Gedung Kampus Akademi Komunitas Olat Maras (Akom),” *Altron J. Elektron. Sains dan Sist. Energi*, vol. 2, no. 2, pp. 39–47, 2023.
[8] R. W. Wardana, M. Hidayatullah, P. A. Topan, and T. Andriani, “Simulasi PLTS Hybrid Menggunakan System Advisor Model (SAM) di Kedai Boba Sumbawa Barat,” *Altron J. Elektron. Sains dan Sist. Energi*, vol. 2, no. 2, pp. 137–144, 2023.
[9] H. B. P. Parapa, “Analisa Dampak Simulasi Bayangan Objek pada PLTS 1,3 MWp Menggunakan Software SAM,” *J. Tek. Mesin Sinergi*, vol. 21, no. 2, pp. 292–300, 2023, doi: https://doi.org/10.31963/sinergi.v21i2.4485.