

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transisi energi global menuju sistem ketenagalistrikan rendah karbon telah mendorong peningkatan dalam pemanfaatan energi terbarukan, dengan energi surya sebagai pilar utama. Berdasarkan laporan *World Energy Outlook 2023* dari *International Energy Agency* (IEA), konsumsi energi final dalam bentuk listrik diproyeksikan meningkat hingga sekitar 53% pada tahun 2050, lebih dari dua kali lipat dibandingkan porsi tahun 2022 yang masih berada pada kisaran 20% [1]. Kondisi ini menuntut percepatan pengembangan sumber energi terbarukan sebagai pengganti energi fosil yang semakin menipis karena paling banyak digunakan untuk menghasilkan listrik.

Di Indonesia, berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), mayoritas bauran energi pembangkit listrik masih didominasi oleh batu bara sebesar 67,21% dan gas 15,96%, sementara energi baru terbarukan (EBT) baru mencapai 14,11% pada tahun 2022 [2]. Padahal, potensi energi surya Indonesia sangat menjanjikan dengan rata-rata radiasi harian sebesar 4,8 kWh/m²/hari, namun pemanfaatannya baru mencapai sekitar 0,3% dari total potensi teknis yang tersedia [3]. Kesenjangan ini menuntut strategi instalasi PLTS yang lebih presisi, terutama pada sektor bangunan publik dan pendidikan.

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang dimanfaatkan dalam Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) untuk menghasilkan listrik. Proses konversi energi matahari menjadi energi listrik terjadi melalui efek fotovoltaiik yang diterapkan pada panel surya [4]. Efisiensi keluaran daya sistem PLTS dipengaruhi oleh dua parameter desain utama yang sering tidak dianalisis secara simultan: sudut kemiringan panel (*tilt angle*) dan kondisi bayangan parsial (*partial shading*). Sudut kemiringan menentukan seberapa besar radiasi matahari yang diserap panel secara efektif [4]. Di wilayah tropis seperti Indonesia, sudut kemiringan optimal umumnya berada pada rentang 0°–20° [5]. *Peak Sun Hour*

(PSH) digunakan sebagai parameter untuk menggambarkan potensi energi surya harian yang tersedia pada suatu lokasi dan menjadi dasar dalam analisis produksi energi PLTS [6]. Sementara itu, *partial shading* menyebabkan ketidaksesuaian arus (*mismatch*) pada rangkaian sel surya sehingga daya keluaran sistem menurun [7]. Selain itu, besarnya penurunan daya juga dipengaruhi oleh konfigurasi susunan modul dan kondisi lingkungan pemasangan, terutama pada area perkotaan yang berpotensi mengalami bayangan dari berbagai objek di sekitarnya [8]. Pada penelitian ini, *shading* dibuat secara terkontrol sebesar 50% pada permukaan panel surya agar kondisi pengujian lebih konsisten, terukur, dan mudah direplikasi.

Dalam praktik instalasi, terdapat dua konfigurasi yang umum digunakan: *Ground-mounted* (di atas tanah) dan *Rooftop* (di atas atap gedung). Keduanya memiliki karakteristik termal dan bayangan yang berbeda. Sistem *Ground-mounted* memiliki fleksibilitas sudut lebih tinggi dan sirkulasi udara yang lebih baik, namun lebih rentan terhadap *shading* dari objek di permukaan tanah. Sistem *Rooftop* lebih efisien dalam pemanfaatan lahan, namun berpotensi mengalami peningkatan temperatur akibat pantulan panas permukaan atap [9].

Meskipun berbagai penelitian telah membahas pengaruh sudut kemiringan [12] [13] dan *shading* [10] [11] secara terpisah, kajian eksperimental yang secara langsung membandingkan kinerja sistem *Ground-mounted* dan *Rooftop* dengan mempertimbangkan kombinasi sudut kemiringan dan *partial shading* berdasarkan nilai *Peak Sun Hour* (PSH) pada lokasi yang sama masih sangat terbatas. Penelitian yang menggabungkan pengujian lapangan dengan validasi simulasi *PVsyst* juga masih jarang dilakukan [14].

Gedung Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia (FT UKI) dipilih sebagai lokasi penelitian karena memiliki kedua karakteristik instalasi tersebut dimana area terbuka untuk *Ground-mounted* dan area *Rooftop* yang representatif. Lokasi ini berada di Jakarta Timur dengan kondisi PSH yang fluktuatif dan banyak potensi hambatan bayangan khas lingkungan perkotaan. Oleh karena itu, analisis komparatif antara sistem *Ground-mounted* dan *Rooftop* menjadi penting untuk dilakukan. Studi ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi sudut kemiringan dan

intensitas bayangan terhadap performa kedua sistem berdasarkan data PSH riil di Gedung FT UKI.

Berdasarkan urgensi tersebut, penelitian ini disusun dengan judul: ”**Analisis Komparatif Pengaruh *Shading* dan Sudut Kemiringan Terhadap Kinerja PLTS 40 Wp pada Sistem *Ground-mounted* dan *Rooftop* di Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia**”. Pemilihan kapasitas modul 40 Wp didasarkan pada pertimbangan bahwa penelitian ini bersifat prototipe skala laboratorium yang berfokus pada analisis parameter teknis, sehingga variabel dapat dikontrol secara presisi.

Tabel 1. 1 *Gap Research Analysis*

Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Fokus Penelitian	Metode	Hasil Penelitian	Keterbatasan	Gap Penelitian Ini
Abdulridha & Tuama (2021) [10]	<i>Study of the Partial Shading Effect on the Performance of Silicon PV Panels String</i>	Pengaruh <i>shading</i> parsial pada rangkaian PV	Eksperimen	<i>Partial shading</i> menyebabkan penurunan daya akibat efek mismatch	Tidak mempertimbangkan perbedaan lokasi pemasangan dan variasi sudut kemiringan	Penelitian ini membandingkan sistem <i>Rooftop</i> dan <i>Ground-mounted</i> serta variasi sudut kemiringan
Muchlishah dkk. (2022) [11]	Peningkatan Efisiensi Sistem PLTS melalui Optimasi Susunan Array Panel Surya	Optimasi konfigurasi <i>array</i> dan pengaruh <i>shading</i>	Simulasi	<i>Shading</i> menurunkan daya sekitar 10–15% akibat mismatch	Tidak ada validasi pengukuran langsung	Penelitian ini menggunakan pengujian langsung di lapangan
Sugiono dkk. (2023) [12]	Pengaruh Sudut Kemiringan	Pengaruh sudut kemiringan	Simulasi	Sudut kemiringan mempengaruhi	Tidak mempertimbangkan	Penelitian ini menggabungkan sudut

Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Fokus Penelitian	Metode	Hasil Penelitian	Keterbatasan	Gap Penelitian Ini
	Panel Surya Terhadap Potensi Pemanfaatan PLTS Rooftop di Politeknik Negeri Semarang	terhadap kinerja PLTS Rooftop		daya dan energi yang dihasilkan	pengaruh <i>shading</i>	kemiringan dan <i>partial shading</i> 50%
Hermawan & Nurpulaela (2024) [13]	Penilaian Produktivitas Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terhadap Variabilitas Cuaca: Simulasi <i>PVsyst</i>	Produktivitas PLTS dengan <i>PVsyst</i>	Simulasi	Variasi cuaca mempengaruhi output energi sistem	Tidak divalidasi dengan data pengukuran langsung	Penelitian ini membandingkan hasil simulasi dengan data lapangan
Zheng dkk. (2025) [14]	<i>Effect of the Overhead Height and Tilt Angle on Comprehensive Performance of Photovoltaic Roof Based on Simulation and</i>	Pengaruh tinggi pemasangan dan sudut kemiringan terhadap performa sistem PV Rooftop	Simulasi dan eksperimen	Sudut kemiringan optimum sebesar 20° memberikan performa energi terbaik pada sistem PV Rooftop	Hanya berfokus pada sistem Rooftop, tidak mempertimbangkan pengaruh <i>partial shading</i> , tidak membandingkan dengan sistem <i>Ground-mounted</i> , dan	Penelitian ini menggunakan pengukuran langsung dan simulasi <i>PVsyst</i> untuk menganalisis pengaruh <i>partial shading</i> 50%, variasi sudut kemiringan, serta perbandingan

Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Fokus Penelitian	Metode	Hasil Penelitian	Keterbatasan	Gap Penelitian Ini
	<i>Experimental Methods</i>				tidak menggunakan analisis PSH	sistem <i>Rooftop</i> dan <i>Ground-mounted</i>

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh *partial shading* sebesar 50% terhadap kinerja PLTS 40 Wp pada sistem *Ground-mounted* dan *Rooftop*?
2. Bagaimana pengaruh variasi sudut kemiringan panel terhadap daya keluaran dan energi PLTS *Ground-mounted* dan *Rooftop*?
3. Bagaimana pengaruh kombinasi efek *partial shading* dan variasi sudut kemiringan panel terhadap produksi energi harian berdasarkan nilai *Peak Sun Hour* (PSH) pada lokasi penelitian?
4. Bagaimana perbandingan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak *PVsyst* dengan data pengukuran lapangan pada setiap variasi sudut kemiringan panel?
5. Sistem mana yang memiliki kinerja lebih optimal, antara PLTS *Ground-mounted* dan *Rooftop*, berdasarkan parameter *shading*, sudut kemiringan, dan PSH?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh *partial shading* terhadap kinerja sistem PLTS 40 Wp pada konfigurasi *Rooftop* dan *Ground-mounted*.
2. Mengevaluasi pengaruh sudut kemiringan panel terhadap daya keluaran dan energi PLTS *Ground-mounted* dan *Rooftop*.
3. Menganalisis pengaruh kombinasi efek *partial shading* dan variasi sudut kemiringan panel terhadap produksi energi harian berdasarkan nilai *Peak Sun Hour* (PSH) pada lokasi penelitian.
4. Membandingkan hasil simulasi *PVsyst* dengan data pengukuran riil untuk

melihat kesesuaian hasil pada setiap variasi sudut kemiringan panel

5. Menentukan konfigurasi PLTS yang paling optimal antara PLTS *Ground-mounted* dan *Rooftop*, berdasarkan parameter *partial shading*, sudut kemiringan, dan PSH.

Kebaruan dan Kontribusi Penelitian (*Novelty*)

Penelitian ini memiliki beberapa kebaruan yang membedakannya secara signifikan dari penelitian-penelitian sebelumnya sebagaimana dirangkum dalam Tabel 1.1 *Gap Research Analysis*. Perbedaan utama penelitian ini terhadap penelitian terdahulu adalah sebagai berikut:

- (1) Integrasi analisis simultan *partial shading* dan sudut kemiringan. Penelitian Abdulridha dan Tuama (2021) [10] hanya menganalisis pengaruh *partial shading* tanpa variasi sudut kemiringan. Sugiono dkk. (2023) [12] hanya mengevaluasi pengaruh sudut kemiringan tanpa kondisi *shading*. Penelitian ini untuk pertama kalinya mengintegrasikan kedua variabel tersebut (*partial shading* 50% $\times$ tiga variasi sudut: 10°, 20°, 30°) secara simultan dalam satu rangkaian eksperimen, sehingga dapat dianalisis efek interaksi antar variabel yang tidak dapat diperoleh dari penelitian terpisah.
- (2) Perbandingan langsung *Rooftop* vs *Ground-mounted* pada lokasi yang sama. Zheng dkk. (2025) [14] hanya meneliti sistem *Rooftop*; tidak ada dari penelitian terdahulu yang secara eksplisit membandingkan kedua konfigurasi pemasangan ini pada lokasi yang identik dan dalam kondisi perlakuan yang sama. Penelitian ini menggunakan dua prototipe beroperasi secara bersamaan di lokasi yang sama (Gedung FT UKI), sehingga perbedaan performa yang terukur dapat diatribusikan sepenuhnya pada perbedaan konfigurasi, bukan pada perbedaan kondisi cuaca atau waktu pengujian.
- (3) Evaluasi performa berbasis *Peak Sun Hour* (PSH) aktual lokasi. Penelitian terdahulu (Abdulridha dan Tuama, 2021; Muchlishah dkk., 2022) [10] [11] tidak menggunakan PSH sebagai parameter evaluasi performa. Penelitian ini menggunakan PSH = 4,8 jam/hari (PVGIS, lokasi Jakarta Timur) sebagai acuan teoritis energi maksimum dan menghitung *Performance Ratio* (PR)

aktual setiap konfigurasi, memberikan konteks yang lebih relevan bagi pengambil keputusan instalasi PLTS di wilayah serupa.

- (4) Triangulasi metode: eksperimen lapangan + simulasi PVsyst + analisis statistik regresi. Hermawan dan Nurpulaela (2024) [13] hanya menggunakan simulasi PVsyst tanpa validasi data lapangan; Muchlishah dkk. (2022) [11] hanya menggunakan simulasi tanpa pengukuran langsung. Penelitian ini menggabungkan pengukuran lapangan riil, validasi silang dengan simulasi PVsyst, dan analisis regresi linear berganda untuk membuktikan signifikansi statistik pengaruh variabel bebas terhadap daya keluaran menghasilkan kesimpulan yang lebih kuat dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.
- (5) Konteks geografis spesifik wilayah tropis perkotaan Indonesia. Penelitian Zheng dkk. (2025) [14] dilakukan pada konteks iklim non-tropis, dan Sugiono dkk. (2023) [12] pada lokasi di Semarang. Penelitian ini secara khusus dilakukan di Jakarta Timur salah satu pusat kota terbesar di Indonesia yang memiliki karakteristik PSH, urban heat island, dan potensi bayangan perkotaan yang khas. Temuan penelitian ini relevan secara langsung bagi perencanaan instalasi PLTS pada gedung-gedung institusi pendidikan di kawasan perkotaan tropis Indonesia.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian ini terarah dan tidak meluas dari ruang lingkup yang telah ditentukan, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan pada dua konfigurasi pemasangan sistem PLTS, yaitu *Ground-mounted* dan *Rooftop* di lingkungan Gedung Fakultas Teknik UKI.
2. Variasi sudut kemiringan panel (*tilt angle*) dibatasi pada 10°, 20°, dan 30°.
3. Pengujian *shading* dilakukan secara parsial terkontrol sebesar 50% dari luas permukaan panel surya, dengan menggunakan penutup buatan (misalnya triplek atau *acrylic*), sehingga kondisi *shading* dapat dibuat konstan dan terukur.
4. Posisi *shading* dibuat tetap pada satu sisi panel (misalnya sisi atas) selama pengujian untuk menjaga konsistensi data.

5. Data yang digunakan merupakan data pengukuran langsung (*real-time*) dan dikaitkan dengan nilai *Peak Sun Hour* (PSH) lokasi penelitian yang diperoleh dari PVGIS.
6. Parameter yang dianalisis dalam penelitian ini meliputi:
 - Tegangan, V (Volt)
 - Arus, A (Ampere)
 - Daya keluaran (Watt)
 - Energi harian (Watt-hour)
 - Efisiensi sistem (%)
7. Sistem yang digunakan memiliki konfigurasi komponen yang sama (panel, SCC, baterai, dan beban), sehingga perbedaan kinerja hanya dipengaruhi oleh:
 - Sudut kemiringan
 - Kondisi *shading*
 - Lokasi pemasangan
8. Penelitian ini dilakukan perbandingan antara sistem instalasi *Ground-mounted* dan *Rooftop*, dimana sistem *Rooftop* berada pada ketinggian sekitar ± 10 meter dari permukaan tanah
9. Pengujian dilakukan pada sistem *off-grid* dengan beban tetap untuk menjaga konsistensi perbandingan.
10. Simulasi menggunakan perangkat lunak *PVsyst* digunakan sebagai pembanding terhadap data pengukuran lapangan untuk membandingkan hasil simulasi dengan data pengukuran lapangan terhadap variasi sudut kemiringan.
11. Penelitian ini tidak membahas aspek ekonomi, biaya investasi, maupun degradasi jangka panjang modul fotovoltaik.

1.5 Manfaat Penelitian

Dengan terlaksananya penelitian ini, diharapkan akan memberikan manfaat berkelanjutan guna pengembangan dikemudian hari antara lain sebagai berikut:

1.5.1 Manfaat Teoritis

- Memberikan kontribusi ilmiah dalam kajian kinerja sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) melalui analisis perbandingan konfigurasi *Ground-mounted* dan *Rooftop* pada lokasi yang sama.
- Menambah referensi akademik terkait pengaruh sudut kemiringan dan *shading effect* terhadap daya dan energi keluaran sistem fotovoltaik.
- Menjadi rujukan bagi penelitian selanjutnya mengenai optimasi sistem PLTS berbasis kondisi aktual lokasi.

1.5.2 Manfaat Praktis

- Memberikan rekomendasi teknis mengenai konfigurasi pemasangan PLTS yang lebih optimal di Gedung Fakultas Teknik UKI.
- Menjadi acuan dalam penentuan sudut kemiringan optimum berdasarkan kondisi *Peak Sun Hour* (PSH).
- Memberikan gambaran dampak *Shading effect* sebagai pertimbangan dalam perencanaan dan desain instalasi PLTS.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini disusun secara sistematis agar pembahasan penelitian lebih terarah dan mudah dipahami. Adapun sistematika penulisan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

Bab I Pendahuluan

Bab ini berisi latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan skripsi yang memberikan gambaran umum mengenai penelitian yang dilakukan.

Bab II Landasan Teori

Bab ini membahas landasan teori yang mendukung penelitian, meliputi konsep dasar sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), prinsip kerja sel fotovoltaik, komponen utama sistem PLTS, pengaruh sudut kemiringan panel surya, efek *shading* terhadap kinerja modul fotovoltaik, konsep *Peak Sun Hour* (PSH), perbandingan sistem *Ground-mounted* dan *Rooftop*, serta simulasi *Pvsyst*.

Bab III Metodologi Penelitian

Bab ini memuat jenis penelitian, lokasi dan waktu, diagram alir, tahapan metodologi, visualisasi prototipe, dan rencana waktu penelitian.

Bab IV Hasil Penelitian dan Analisis

Bab ini menyajikan Memuat data pengukuran lapangan, hasil perhitungan, analisis pengaruh *shading*, sudut kemiringan, dan PSH, perbandingan dengan simulasi *PVsyst* , serta validasi terhadap seluruh tujuan penelitian.

Bab V Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian serta saran yang dapat digunakan sebagai rekomendasi untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

