

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Adapun metode penelitian yang digunakan adalah studi kepustakaan mengenai sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), karakteristik modul fotovoltaik, pengaruh sudut kemiringan (*tilt angle*), dampak *partial shading*, serta analisis nilai *Peak Sun Hour* (PSH) terhadap produksi energi listrik. Selain itu, digunakan metode penelitian kuantitatif melalui perancangan, pembuatan, dan pengujian prototipe sistem PLTS 40 Wp pada konfigurasi *Ground-mounted* dan *Rooftop* untuk memperoleh data parameter listrik berupa tegangan, arus, daya keluaran, energi harian, dan efisiensi sistem.

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) yang bersifat eksperimental kuantitatif. Pendekatan ini dipilih untuk merancang, mengonstruksi, dan menguji performa prototipe sistem PLTS 40 Wp dalam mengonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik sesuai karakteristik lokasi penelitian di Gedung Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia. Hasil pengujian sudut kemiringan lapangan kemudian dibandingkan dengan simulasi menggunakan perangkat lunak *PVsyst* sebagai pendukung terhadap hasil eksperimen, sehingga dapat diperoleh analisis yang lebih komprehensif mengenai kinerja sistem pada kondisi aktual.

3.1.1 Landasan Teori Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian ini dibangun di atas lima landasan teori utama:

- 1) Teori pengukuran dan instrumentasi sistem fotovoltaik.
- 2) Teori desain eksperimen komparatif.
- 3) Teori pemodelan energi surya berbasis psh.
- 4) Teori validasi simulasi pvsyst.
- 5) Teori analisis regresi linear berganda.

Kelima landasan ini memastikan bahwa setiap tahap penelitian dari perancangan prototipe, pengambilan data, hingga analisis hasil dilakukan secara valid, terukur,

dan dapat direplikasi.

3.1.1.1 Teori Pengukuran Parameter Sistem PV

Kinerja sistem fotovoltaik pada penelitian ini dievaluasi berdasarkan empat parameter utama, yaitu tegangan keluaran, arus keluaran, daya keluaran, dan efisiensi sistem. Parameter-parameter tersebut diperoleh melalui pengukuran langsung menggunakan alat ukur selama proses pengujian pada konfigurasi *Ground-mounted* dan *Rooftop* dengan variasi sudut kemiringan panel. Daya keluaran panel surya dihitung menggunakan persamaan (2.1), Energi listrik yang dihasilkan selama periode pengujian dihitung berdasarkan hasil perkalian daya terhadap waktu pengukuran sesuai persamaan (2.6), selanjutnya, daya masukan panel dihitung berdasarkan irradiansi matahari yang diterima permukaan panel menggunakan persamaan (2.2), dan Efisiensi panel surya dihitung dengan persamaan (2.3). Parameter-parameter tersebut digunakan sebagai dasar untuk membandingkan performa sistem *Ground-mounted* dan *Rooftop* pada variasi sudut kemiringan 10°, 20°, dan 30°, baik pada kondisi tanpa *shading* maupun *partial shading* 50%.

3.1.1.2 Teori Desain Eksperimen Faktorial

Penelitian ini menggunakan desain eksperimen faktorial $2 \times 3 \times 2$: dua konfigurasi pemasangan (*Rooftop* dan *Ground-mounted*), tiga variasi sudut kemiringan (10°, 20°, 30°), dan dua kondisi *shading* (tanpa *shading* dan *partial shading* 50%), menghasilkan 12 kombinasi. Desain faktorial dipilih karena memungkinkan evaluasi pengaruh utama (*main effect*) dan interaksi antar faktor secara simultan. Prinsip yang diterapkan meliputi:

- (1) Replikasi setiap konfigurasi diuji selama beberapa hari untuk memperhitungkan variabilitas cuaca.
- (2) Kontrol variabel tetap (spesifikasi panel, orientasi, beban, instrumen) dijaga konstan di seluruh percobaan.
- (3) Kecerentakan kedua sistem *Rooftop* dan *Ground-mounted* diuji pada hari yang sama untuk mengeliminasi bias cuaca harian.

Validitas internal dijaga dengan komponen identik, validitas eksternal didukung oleh lokasi penelitian yang representatif untuk wilayah tropis perkotaan.

Pendekatan desain eksperimen terkontrol ini sejalan dengan metodologi

yang dianjurkan oleh Messenger dan Ventre [23] dan Messenger dan Abtahi [24] dalam mengevaluasi performa sistem PV pada berbagai kondisi orientasi dan lingkungan, yaitu dengan menjaga variabel sistem (modul, kontroler, beban) tetap identik sehingga perbedaan hasil pengukuran dapat diatribusikan secara langsung pada variabel yang diuji (sudut kemiringan, *shading*, dan lokasi pemasangan).

3.1.1.3 Teori Pemodelan PSH

Peak Sun Hour (PSH) merepresentasikan jumlah jam ekuivalen per hari dimana iradiasi matahari berada pada nilai referensi 1.000 W/m^2 , sesuai dengan *Standard Test Condition* (STC). Energi teoritis harian dihitung dengan persamaan (2.6), nilai ini menjadi acuan maksimum teoritis.

Konsep PSH yang digunakan dalam penelitian ini konsisten dengan definisi insolation atau radiasi terintegrasi harian yang dijelaskan oleh Goswami[25], di mana radiasi matahari aktual yang bervariasi sepanjang hari disederhanakan menjadi jumlah jam ekuivalen pada intensitas referensi 1.000 W/m^2 . Messenger dan Ventre [23] juga menegaskan bahwa data PSH bulanan atau tahunan dari basis data PVGIS dapat digunakan untuk memperkirakan energi tahunan sistem PV tanpa harus melakukan simulasi jam demi jam, sehingga pendekatan ini valid digunakan sebagai acuan energi teoritis dalam penelitian ini.

3.1.1.4 Teori Validasi Simulasi *PVsyst*

Penggunaan perangkat lunak simulasi sebagai pembanding hasil pengukuran lapangan merupakan praktik standar dalam rekayasa sistem fotovoltaik, sebagaimana ditegaskan oleh Messenger dan Abtahi [24] yang merekomendasikan penggunaan alat simulasi seperti *NREL System Advisor Model* (SAM) atau perangkat sejenis (termasuk *PVsyst*) untuk memperkirakan energi akibat orientasi dan kondisi pemasangan sebelum dan sesudah instalasi sistem PV aktual. Validasi silang antara hasil simulasi dan pengukuran lapangan, sebagaimana dilakukan dalam penelitian ini, memperkuat keandalan kesimpulan yang diambil mengenai konfigurasi optimal sistem PLTS.

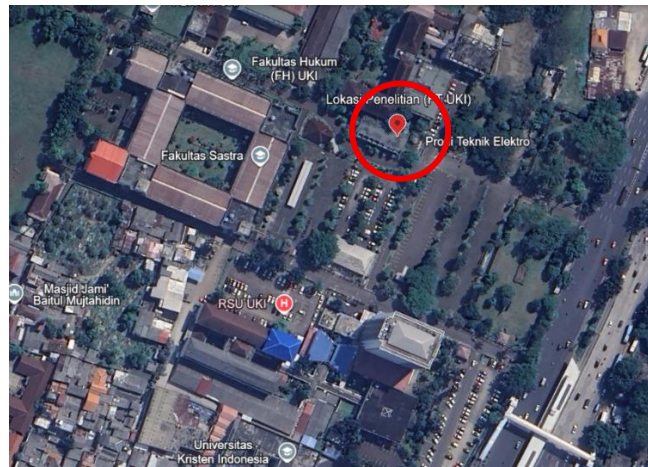
3.1.1.5 Landasan Teori Analisis Regresi Linear Berganda

Regresi linear berganda digunakan untuk memodelkan hubungan kuantitatif antara beberapa variabel bebas dan variabel terikat secara simultan. Model umum

regresi linear berganda adalah: $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon$, di mana Y adalah variabel terikat, X_i adalah variabel bebas ke- i , β_i adalah koefisien regresi, dan ε adalah galat model. Estimasi koefisien dilakukan menggunakan metode *Ordinary Least Squares* (OLS) yang meminimalkan jumlah kuadrat galat. Koefisien determinasi R^2 mengukur proporsi variansi Y yang dijelaskan oleh model. Uji-F digunakan untuk menguji signifikansi model secara keseluruhan, sedangkan uji-t menguji signifikansi masing-masing koefisien. Dalam penelitian ini, analisis regresi diterapkan pada dua variabel terikat, yaitu daya keluaran (Pout) dan efisiensi sistem, dengan lima variabel bebas yang diuji secara simultan, yaitu: X_1 = sudut kemiringan panel (derajat), X_2 = kondisi *shading* (dummy: 0 = tanpa *shading*, 1 = partial *shading* 50%), X_3 = konfigurasi pemasangan (kode: 1 = *Ground-mounted*, 2 = *Rooftop*), X_4 = intensitas radiasi matahari (W/m^2), dan X_5 = temperatur lingkungan ($^{\circ}C$). Penambahan X_4 dan X_5 dilakukan karena kedua parameter tersebut terukur langsung selama pengujian dan secara teoritis turut memengaruhi daya keluaran serta efisiensi sistem PLTS, sehingga model regresi yang dibangun dapat merepresentasikan kondisi pengujian secara lebih menyeluruh.

3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Gedung Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia yang berlokasi di Jl. Mayjen Sutoyo No. 2, Cawang, Jakarta Timur, seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Lokasi Fakultas Teknik UKI. [31]

Lokasi penelitian dipilih karena memungkinkan pemasangan sistem PLTS pada dua konfigurasi berbeda, yaitu:

- Sistem *Rooftop* pada area lahan atas gedung (ketinggian ± 10 m)
- Sistem *Ground-mounted* pada area halaman gedung

Penelitian dilaksanakan selama periode Maret – Mei 2026. Data *Peak Sun Hour* (PSH) pada lokasi penelitian diperoleh dari basis data *Photovoltaic Geographical Information System* (PVGIS).

3.2.1 Identifikasi Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini, variabel-variabel dikelompokkan menjadi tiga kategori utama, yaitu variabel bebas (*independent variable*), variabel tetap (*controlled variable*), dan variabel terikat (*dependent variable*). Identifikasi variabel yang jelas diperlukan untuk memastikan validitas dan konsistensi pengujian serta memungkinkan interpretasi hasil yang akurat.

A. Variabel Bebas (*Independent Variable*)

Variabel bebas adalah variabel yang sengaja diubah atau divariasikan oleh peneliti untuk mengamati pengaruhnya terhadap variabel terikat. Dalam penelitian ini, variabel bebas dibedakan menjadi dua kelompok, yaitu variabel bebas utama yang dimanipulasi secara langsung melalui rancangan eksperimen (tiga jenis), dan variabel bebas tambahan berupa faktor lingkungan yang tidak dapat dikendalikan secara eksperimental namun ikut memengaruhi variabel terikat secara alami,

sehingga turut dimasukkan sebagai variabel bebas khusus pada analisis regresi linear berganda (lihat subbab 3.4.6.B).

1. Sudut Kemiringan Panel (*Tilt Angle*): Tiga variasi sudut kemiringan panel terhadap bidang horizontal, yaitu 10° , 20° , dan 30° . Variasi ini dipilih berdasarkan rentang sudut yang umum digunakan di wilayah tropis Indonesia.
2. Kondisi *Shading* (Bayangan): Dua kondisi operasi panel, yaitu kondisi tanpa *shading* (*clear*) dan kondisi *partial shading* 50% (penutupan 50% luas permukaan panel menggunakan triplek pada sisi atas modul). *Partial shading* 50% dipilih untuk merepresentasikan kondisi bayangan yang umum terjadi di lingkungan perkotaan.
3. Konfigurasi Pemasangan: Dua konfigurasi lokasi pemasangan panel, yaitu sistem *Rooftop* (atap Gedung FT UKI, ketinggian ± 10 m) dan sistem *Ground-mounted* (permukaan tanah area Gedung FT UKI).
4. Variabel Bebas Tambahan (Kovariant Lingkungan): Intensitas radiasi matahari (W/m^2) dan temperatur lingkungan ($^\circ\text{C}$) yang direkam pada setiap titik pengukuran. Kedua variabel ini berbeda sifatnya dari ketiga variabel bebas di atas karena tidak sengaja divariasikan oleh peneliti, melainkan berubah secara alami mengikuti kondisi cuaca aktual saat pengujian berlangsung. Meskipun demikian, karena keduanya terbukti memengaruhi daya keluaran dan efisiensi sistem (lihat subbab 2.5.1 dan 2.5.4), kedua variabel ini turut disertakan sebagai variabel bebas pada model regresi linear berganda (subbab 3.4.6.B) agar pengaruh murni dari sudut kemiringan, shading, dan konfigurasi pemasangan dapat diisolasi secara statistik dari pengaruh fluktuasi lingkungan.

B. Variabel Tetap (*Controlled Variable*)

Variabel tetap adalah variabel yang dijaga konstan selama pengujian untuk menghilangkan pengaruh faktor luar terhadap variabel terikat. Variabel tetap dalam penelitian ini meliputi lima aspek utama.

1. Spesifikasi Panel Surya: Kedua sistem (*Rooftop* dan *Ground-mounted*) menggunakan panel surya monocrystalline identik dengan kapasitas 40 Wp.
2. Orientasi Azimuth: Seluruh konfigurasi panel diorientasikan menghadap arah yang sama sesuai dengan posisi geografis lokasi penelitian.

3. Jenis Beban: Beban yang digunakan adalah lampu LED yang terhubung melalui sistem baterai dan *Solar Charge Controller* (SCC).
4. Interval dan Durasi Pengukuran: Pengukuran dilakukan setiap interval waktu 15 menit selama periode 08.00–16.00 WIB (8 jam) pada setiap hari pengujian.
5. Instrumen Pengukuran: Alat ukur yang digunakan meliputi multimeter digital (pengukuran tegangan dan arus), lux meter (pengukuran iradiasi dan temperatur lingkungan) yang seluruhnya dikalibrasi sebelum pengujian. Perlu ditegaskan bahwa keseragaman instrumen dan prosedur pengukuran inilah yang dijaga tetap (controlled), bukan nilai iradiasi dan temperatur itu sendiri, nilai iradiasi dan temperatur yang terekam tetap bervariasi mengikuti kondisi cuaca aktual, sehingga keduanya diperlakukan sebagai variabel bebas tambahan pada analisis regresi linear berganda sebagaimana dijelaskan pada bagian A butir 4.

C. Variabel Terikat (*Dependent Variable*)

Variabel terikat adalah variabel yang diukur dan diamati sebagai respons terhadap perubahan variabel bebas. Variabel terikat dalam penelitian ini mencakup: tegangan keluaran (V_{out} , V), arus keluaran (I_{out} , A), daya keluaran ($P_{out} = V_{out} \times I_{out}$, W), efisiensi sistem ($\eta = P_{out}/P_{in} \times 100\%$, %), dan energi harian (E , Wh/hari).

Keterkaitan antara variabel tetap, variabel bebas, uji hipotesis statistik, dan regresi linear berganda dapat dijelaskan sebagai berikut. Variabel tetap (spesifikasi panel, orientasi azimuth, jenis beban, interval pengukuran, dan prosedur instrumentasi) berfungsi menjaga homogenitas kondisi pengujian, sehingga perbedaan hasil pengukuran antar kondisi dapat diatribusikan pada perubahan variabel bebas, bukan pada perbedaan kondisi eksperimen lainnya. Ketiga variabel bebas utama (sudut kemiringan, shading, dan konfigurasi pemasangan) diuji signifikansinya menggunakan uji hipotesis statistik (uji-t dan uji-F) untuk membuktikan bahwa perbedaan rata-rata P_{out} dan efisiensi antar level variabel tersebut bersifat signifikan secara statistik dan bukan kebetulan.

Selanjutnya, seluruh variabel bebas, baik yang dimanipulasi (sudut, shading, konfigurasi) maupun yang bersifat kovariat lingkungan (intensitas radiasi dan temperatur), dimasukkan secara bersamaan ke dalam satu model regresi linear

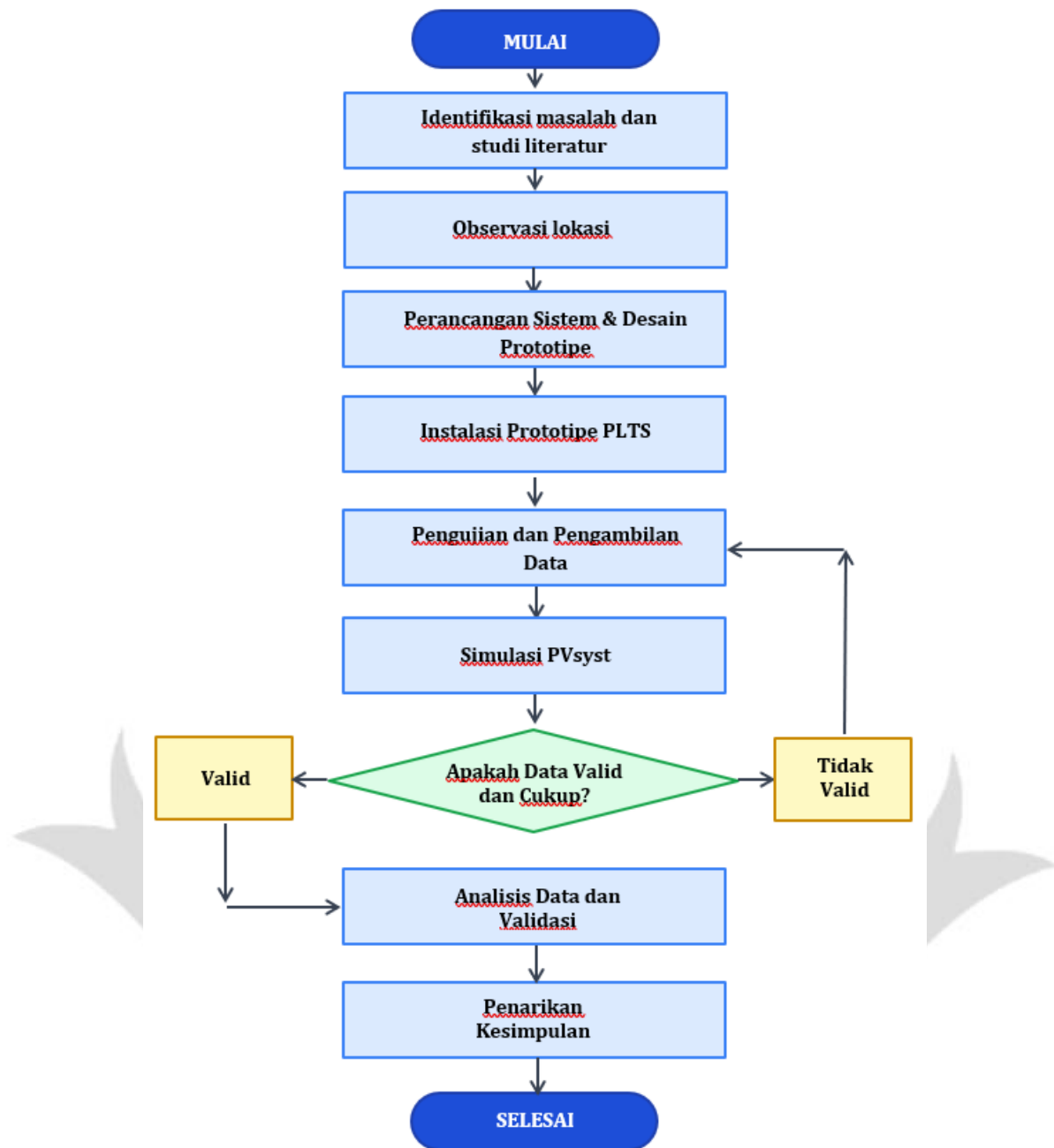
berganda terhadap masing-masing variabel terikat (Pout dan efisiensi). Dengan cara ini, sistem regresi berganda tidak hanya menguji pengaruh variabel bebas utama, tetapi juga mengendalikan (mengontrol secara statistik) pengaruh variabel lingkungan yang tidak dapat dijaga tetap secara eksperimental, sehingga estimasi koefisien untuk sudut kemiringan, shading, dan konfigurasi pemasangan mencerminkan pengaruh bersih (net effect) dari ketiga variabel tersebut setelah pengaruh faktor lingkungan dikendalikan. Hasil selengkapnya diuraikan pada subbab 3.4.6 dan dianalisis pada subbab 4.4.6.

3.3 Diagram Alir Penelitian (*Flowchart*)

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan secara sistematis melalui serangkaian tahapan terstruktur guna menjamin validitas dan keterukuran hasil, yang meliputi:

5. Identifikasi Masalah & Studi Literatur
6. Observasi Lokasi & Pengumpulan Data Radiasi (PSH)
7. Perancangan Sistem (Desain Engineering)
8. Pembuatan dan Instalasi Prototipe
9. Pengujian dan Pengambilan Data Lapangan
10. Simulasi dan Analisis Data
11. Kesimpulan dan Rekomendasi

Metode penelitian yang akan dilakukan digambarkan dalam bentuk diagram alir penelitian seperti pada Gambar berikut ini.



Gambar 3. 2 Diagram alur penelitian.

3.4 Tahapan Detail Metodologi

Berdasarkan hal tersebut dan juga tujuan penelitian yang ingin dicapai, maka metode penelitian yang akan dilakukan dibagi menjadi beberapa tahapan yaitu:

1. Studi Literatur

Melakukan studi literatur menyeluruh untuk memahami konsep dasar

sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), karakteristik pemasangan *Ground-mounted* dan *Rooftop*, pengaruh sudut kemiringan (*tilt angle*), dampak bayangan parsial (*partial shading*), serta pemahaman mengenai *Peak Sun Hour* (PSH) khususnya di wilayah Jakarta Timur dan penggunaan perangkat lunak *PVsyst* untuk pemodelan dan estimasi produksi energi sebagai data pembanding.

2. Identifikasi Lokasi dan Data PSH

Menentukan titik penempatan panel di area halaman (*Ground*) dan lahan atas gedung (*Rooftop*) Gedung FT UKI. Mengumpulkan data sekunder mengenai penyinaran matahari (PSH) di Jakarta Timur sebagai acuan nilai radiasi matahari harian dan intensitas cahaya.

3. Persiapan Alat dan Bahan Eksperimen

Menyiapkan perangkat fisik penelitian meliputi

Tabel 3. 1 Kebutuhan Komponen Sistem PLTS

No	Nama Komponen	Jumlah
1	Panel Surya 40 Wp <i>Monocrystalline</i>	4 unit
2	Baterai 12V 14Ah	4 unit
3	<i>Solar Charge Controller</i> PWM	4 unit
5	Lampu LED 12V (20 Watt)	4 unit
6	Kabel Pv	8 meter
7	Kabel NYMHY 2 x 1,5mm	5 meter
	Kabel NYAF 1 x 2,5mm Merah	5 meter
	Kabel NYAF 1 x 2,5mm Biru	5 meter
8	Triplek	4 x (470 x 600) mm
9	Isolasi	1 unit
10	Fitting	4 unit
11	Rangka besi	4 set
12	Hollow	16 meter
13	Jack Banana	14 set

14	Alat Ukur	
	Multimeter	8 unit
	Lux meter	2 unit
	Busur	1 unit

4. Pengambilan Data Lapangan:

Pengujian meliputi pengukuran arus dan tegangan, output daya, efisiensi sistem, energi harian, analisis output daya saat terdapat *shading* pada setiap variasi sudut kemiringan di bawah kondisi cuaca riil dan mencatat waktu serta intensitas cahaya saat itu.

5. Pemodelan dan Simulasi *PVsyst*

Melakukan simulasi menggunakan perangkat lunak *PVsyst*, dengan menginput parameter teknis kapasitas modul (40 Wp), baterai dan beban serta koordinat lokasi FT UKI untuk mendapatkan prediksi *output* energi sebagai data pembanding variasi kemiringan sudut.

6. Teknik Analisis Data

Berikut uraian untuk melakukan Analisis Data Komparatif serta Evaluasi dan Validasi berdasarkan metodologi yang tercantum dalam dokumen penelitian ini.

a) Analisis Data Komparatif

Analisis ini bertujuan membedah performa sistem *Ground-mounted* (GM) vs *Rooftop* (RT) dengan membandingkan data lapangan terhadap standar teoritis (**PSH**) dan simulasi (***PVsyst***).

- Perhitungan Parameter Kinerja Utama

Gunakan data mentah dari hasil pengukuran lapangan untuk menghitung tiga indikator berikut:

- ✓ Daya Keluaran (P) : Hitung daya sesaat dari setiap variasi sudut (10°, 20°, 30°) pada kedua lokasi.
- ✓ Efisiensi Sistem (η) : Rasio daya yang dihasilkan terhadap potensi energi matahari yang diterima luas permukaan panel.

- ✓ Energi Total Harian (E) : Akumulasi daya yang dihasilkan selama waktu penyinaran (08.00 – 16.00 WIB), dengan interval waktu pengambilan setiap 15 menit sekali.

b) Perbandingan terhadap PSH Jakarta Timur

Membandingkan hasil energi harian (E) dengan nilai **Peak Sun Hour (PSH)**.

- ✓ Analisis : Jika PSH Jakarta Timur adalah 4,8 jam, maka panel 40 Wp secara teoritis menghasilkan $40 \text{ Wp} \times 4,8 \text{ jam} = 192 \text{ Wh}$.
- ✓ Evaluasi : Hitung seberapa besar persentase pencapaian energi riil di FT UKI.
- ✓ Validasi Simulasi *PVsyst* vs Data Riil

Perbandingan untuk mengetahui tingkat akurasi model simulasi.

- Input *PVsyst*: Menginput koordinat FT UKI, spesifikasi panel 40 Wp, dan variasi sudut yang sama.
- Analisis : Membandingkan secara langsung hasil simulasi dan pengukuran lapangan berdasarkan nilai dan tren. Identifikasi apakah *PVsyst* cenderung terlalu optimis (*overestimate*) atau pesimis (*underestimate*) pada sudut kemiringan tertentu di lokasi FT UKI.

c) Evaluasi dan Validasi (Penentuan Titik Optimal)

Bagian ini menyimpulkan konfigurasi terbaik bagi FT UKI berdasarkan interaksi variabel lingkungan.

- Matriks Penentuan Titik Optimal
Evaluasi dilakukan dengan menggabungkan tiga faktor utama:
 - ✓ Efisiensi Tertinggi: Sudut mana ($10^\circ - 30^\circ$) yang secara konsisten menghasilkan daya (P) paling besar pada jam puncak matahari.
 - ✓ Ketahanan terhadap *Shading* :
Analisis ketahanan sistem terhadap *shading* dilakukan dengan membandingkan kinerja PLTS pada kondisi tanpa *Shading* dan *partial shading* 50% pada masing-masing konfigurasi pemasangan.
Ground-mounted:
Analisis dilakukan dengan mengamati penurunan arus, tegangan,

dan daya pada kondisi *shading* 50% dibandingkan tanpa *shading* .

Rooftop:

Analisis dilakukan dengan metode yang sama, yaitu membandingkan parameter pada kondisi tanpa *shading* dan *shading* 50%.

Kesimpulan:

Konfigurasi sistem yang menunjukkan penurunan daya paling kecil pada kondisi *shading* 50% dianggap memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap pengaruh *shading*.

✓ Faktor Temperatur Lingkungan:

Validasi apakah sirkulasi udara di *Ground-mounted* (yang lebih terbuka dari bawah) mampu menjaga suhu modul lebih rendah sehingga efisiensinya lebih stabil dibandingkan *Rooftop* yang mungkin lebih panas. Pengaruh temperatur dianalisis berdasarkan perubahan daya dan efisiensi sistem pada masing-masing konfigurasi pemasangan. Sistem dengan penurunan daya yang lebih kecil pada kondisi pengujian dianggap memiliki stabilitas performa yang lebih baik terhadap pengaruh temperatur lingkungan.

• Sintesis Akhir

Konfigurasi Optimal:

Dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran energi, daya, dan efisiensi pada setiap variasi sudut kemiringan dan lokasi pemasangan.

Selain itu, pengaruh *partial shading* 50% juga dipertimbangkan untuk melihat ketahanan sistem terhadap penurunan performa. Konfigurasi yang menghasilkan energi dan efisiensi tertinggi serta menunjukkan penurunan daya paling kecil saat kondisi *shading* dianggap sebagai konfigurasi terbaik. Memilih kombinasi Lokasi dan Sudut yang menghasilkan nilai energi tahunan tertinggi dengan risiko *Shading* terendah.

- Rekomendasi Spesifik FT UKI:

Berdasarkan hasil analisis, akan ditentukan konfigurasi sistem PLTS yang paling optimal pada lokasi penelitian.

Rekomendasi diberikan dalam bentuk pernyataan yang menjelaskan kombinasi lokasi pemasangan dan sudut kemiringan terbaik berdasarkan hasil pengukuran dan perbandingan data.

3.4.1 Analisis Statistik: Uji Hipotesis dan Regresi Linear Berganda

Untuk membuktikan hubungan statistik antara variabel bebas (sudut kemiringan, kondisi *shading*, konfigurasi pemasangan, intensitas radiasi matahari, dan temperatur lingkungan) dengan variabel terikat (daya keluaran dan efisiensi sistem), penelitian ini menerapkan dua pendekatan analisis statistik: uji hipotesis statistik dan regresi linear berganda.

A. Uji Hipotesis Statistik (Uji-t dan Uji-F)

Uji hipotesis dilakukan untuk menentukan apakah perbedaan nilai rata-rata daya keluaran antar konfigurasi bersifat signifikan secara statistik atau hanya merupakan variasi acak. Hipotesis yang diuji adalah sebagai berikut.

H₀ (Hipotesis Nol): Tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada daya keluaran rata-rata (Pout) antara konfigurasi sudut kemiringan yang berbeda (10°, 20°, 30°) dan antara kondisi *shading*/tanpa *shading*.

H₁ (Hipotesis Alternatif): Terdapat perbedaan yang signifikan pada daya keluaran rata-rata (Pout) antara konfigurasi sudut kemiringan yang berbeda dan antara kondisi *shading*/tanpa *shading* ($\alpha = 0,05$).

Uji-F One-Way ANOVA digunakan untuk membandingkan rata-rata lebih dari dua kelompok (tiga variasi sudut kemiringan) secara simultan. Nilai F-statistik dihitung sebagai rasio antara variansi antar kelompok (between-group variance) dan variansi dalam kelompok (within-group variance): $F = MSB/MSW$, di mana MSB adalah *Mean Square Between groups* dan MSW adalah *Mean Square Within groups*. Jika $F_{hitung} > F_{tabel}$ ($df_1 = k-1$, $df_2 = N-k$, $\alpha = 0,05$), maka H₀ ditolak dan disimpulkan bahwa setidaknya satu pasangan konfigurasi memiliki rata-rata yang berbeda secara signifikan.

B. Analisis Regresi Linear Berganda

Regresi linear berganda digunakan untuk memodelkan hubungan kuantitatif antara variabel bebas (sudut kemiringan, kondisi *shading*, konfigurasi pemasangan, intensitas radiasi matahari, dan temperatur lingkungan) dengan variabel terikat. Analisis regresi dalam penelitian ini diterapkan pada dua model terpisah dengan variabel terikat yang berbeda, yaitu daya keluaran (Pout) dan efisiensi sistem, untuk mengetahui variabel bebas mana yang paling berpengaruh terhadap masing-masing parameter kinerja PLTS. Model regresi yang dibangun adalah:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \varepsilon$$

di mana: Y = variabel terikat (Pout dalam W, atau efisiensi dalam %); X1 = sudut kemiringan panel (derajat: 10, 20, 30); X2 = kondisi *shading* (variabel dummy: 0 = tanpa *shading*, 1 = partial *shading* 50%); X3 = konfigurasi pemasangan (kode: 1 = *Ground-mounted*, 2 = *Rooftop*); X4 = intensitas radiasi matahari (W/m²); X5 = temperatur lingkungan (°C); β_0 = konstanta intersep; β_1 sampai β_5 = koefisien regresi masing-masing variabel bebas; ε = error term (galat model).

Estimasi koefisien regresi dilakukan menggunakan metode *Ordinary Least Squares* (OLS) dengan bantuan perangkat lunak IBM SPSS Statistics, yang bekerja dengan meminimalkan jumlah kuadrat galat (residual) antara nilai aktual dan nilai prediksi model. Setiap koefisien regresi (β) menunjukkan besar dan arah perubahan variabel terikat untuk setiap kenaikan satu satuan variabel bebas terkait, dengan asumsi variabel bebas lainnya konstan (*ceteris paribus*).

Koefisien determinasi (R^2) model regresi menunjukkan proporsi variansi variabel terikat yang dapat dijelaskan secara simultan oleh kelima variabel bebas tersebut, sedangkan koefisien Beta terstandarisasi (*Standardized Coefficients*) digunakan untuk membandingkan besar kontribusi relatif masing-masing variabel bebas terhadap variabel terikat karena satuan pengukurannya telah disetarakan. Uji-F pada tabel ANOVA digunakan untuk menguji signifikansi model regresi secara keseluruhan (uji simultan), sedangkan uji-t pada tabel koefisien digunakan untuk menguji signifikansi pengaruh masing-masing variabel bebas secara individual (uji parsial) pada taraf signifikansi $\alpha = 0,05$. Hasil estimasi koefisien, nilai R^2 , serta

pembahasan signifikansi masing-masing variabel disajikan dan dianalisis pada BAB IV.

C. Uji Korelasi Pearson

Uji korelasi Pearson (r) dilakukan untuk mengukur kekuatan dan arah hubungan linear antara variabel bebas kontinu (sudut kemiringan) dengan variabel terikat (daya keluaran dan efisiensi). Nilai koefisien korelasi r berkisar -1 hingga $+1$, di mana r mendekati -1 menunjukkan korelasi negatif kuat (peningkatan sudut kemiringan berkorelasi dengan penurunan daya). Berdasarkan tren data pengukuran yang konsisten menurun seiring peningkatan sudut kemiringan, hasil analisis korelasi mengindikasikan adanya korelasi negatif yang kuat antara sudut kemiringan dan daya keluaran pada lokasi dan kondisi penelitian ini.

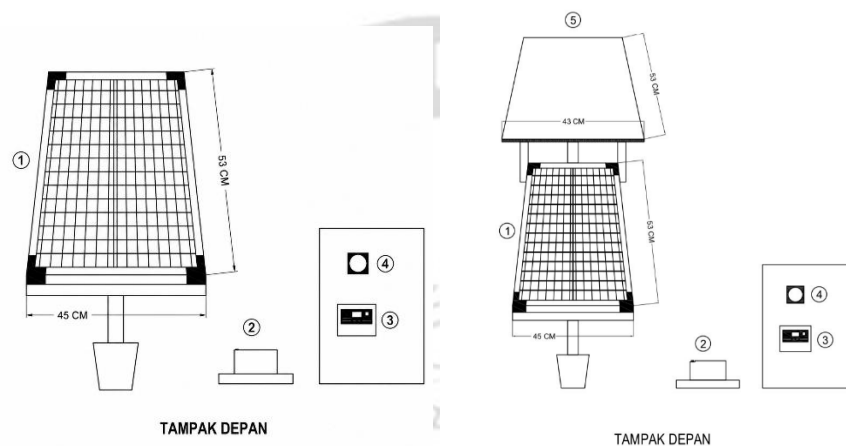
Penggunaan regresi sebagai alat analisis kuantitatif dalam rekayasa sistem fotovoltaik juga didukung oleh literatur acuan utama penelitian ini. Messenger dan Ventre [25] serta Messenger dan Abtahi [27] menjelaskan bahwa metode least mean square fit (kuadrat terkecil) dapat diterapkan menggunakan perangkat lunak seperti Excel atau MATLAB untuk menemukan persamaan terbaik yang merepresentasikan hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat, dengan nilai koefisien determinasi R^2 sebagai indikator *goodness-of-fit*; R^2 mendekati 1 menunjukkan kesesuaian model yang sangat baik terhadap data observasi, sedangkan R^2 yang rendah mengindikasikan perlunya jenis regresi lain atau penambahan variabel penjelas [25],[27].

Pendekatan regresi berganda berbasis *multiple least-squares fit* juga digunakan secara luas dalam pemodelan radiasi matahari, sebagaimana ditunjukkan oleh Goswami [26] dalam pengembangan model *Daily Integration* (DI) oleh Gueymard (2000), di mana koefisien regresi a_1 dan a_2 diperoleh melalui multiple least-squares fit terhadap data dari 135 stasiun pengamatan di berbagai lokasi geografis dan iklim. Pendekatan serupa diadopsi dalam penelitian ini untuk memodelkan hubungan antara sudut kemiringan, kondisi *shading*, dan konfigurasi pemasangan terhadap daya keluaran sistem PLTS, dengan prinsip metodologis yang konsisten dengan model regresi berganda pada literatur rekayasa surya.

3.5 Visualisasi *Prototype*

3.5.1 Sistem PLTS *Rooftop* dan *Ground-mounted*

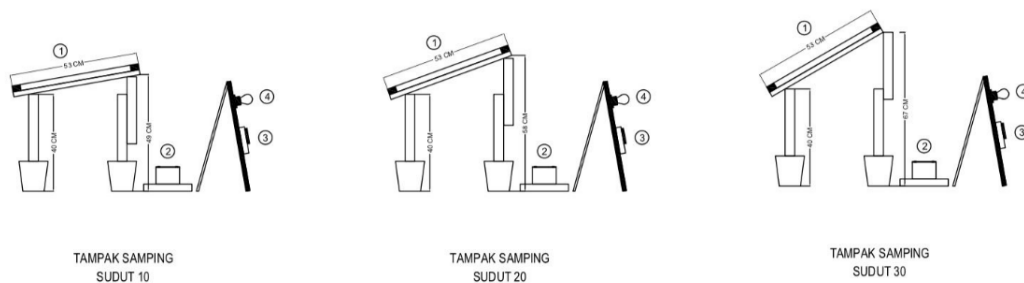
Dalam penelitian ini, sistem PLTS divisualisasikan dalam dua konfigurasi pemasangan, yaitu sistem *Rooftop* dan sistem *Ground-mounted*. Desain prototype PLTS dapat dilihat pada Gambar 3.3 sampai Gambar 3.7, dengan komponen utamanya berupa modul surya 40 Wp *Monocrystalline*. Dimana sudut kemiringan modul surya dapat diatur sesuai kebutuhan.



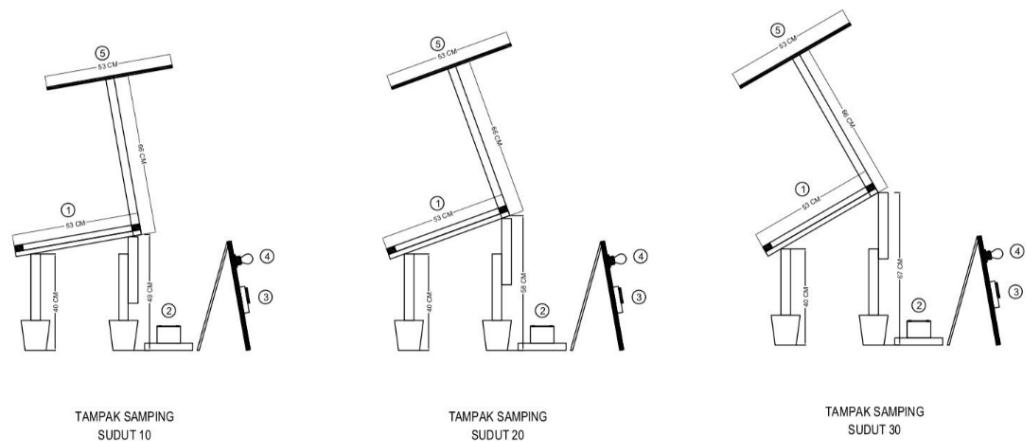
Gambar 3. 3 Tampak Depan Desain 2D Prototype PLTS.

Keterangan :

1. Kiri tanpa *partial shading*
2. Kanan dengan *partial shading* 50%



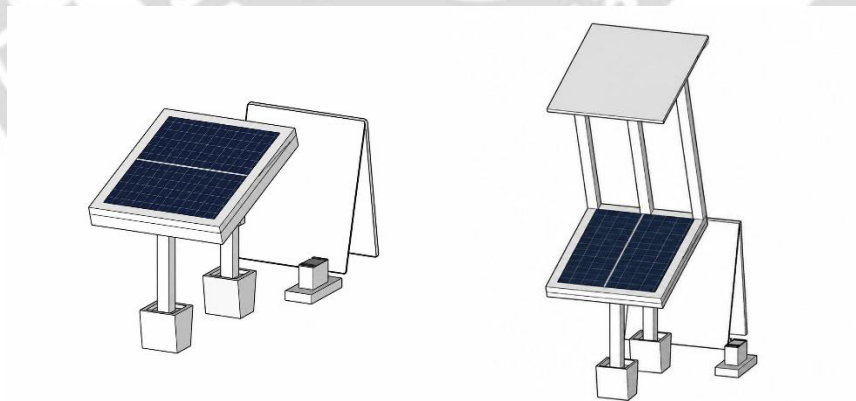
Gambar 3. 4 Tampak Samping Desain 2D Prototype PLTS Tanpa *Shading*.



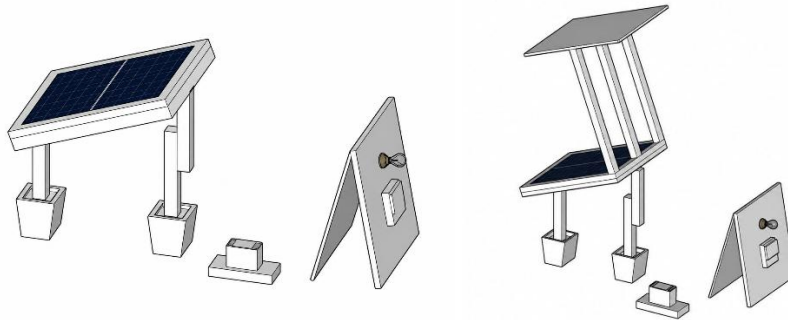
Gambar 3. 5 Tampak Samping Desain 2D Prototype PLTS dengan *Partial Shading* 50%.

Keterangan:

1. Modul Surya
2. Baterai
3. *Solar Charge Controller*
4. Lampu Led
5. Triplek



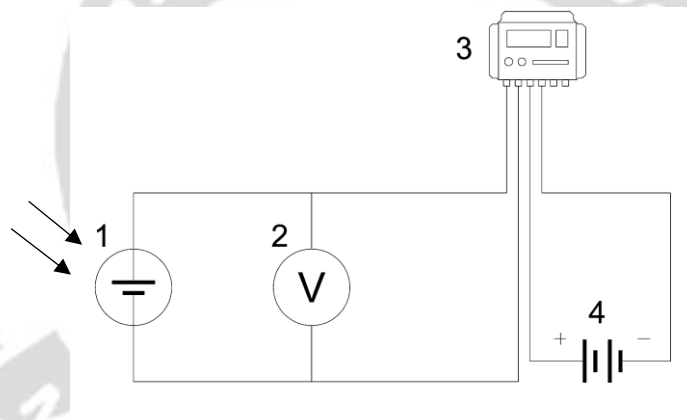
Gambar 3. 6 Tampak Depan Desain 3D Prototype PLTS



Gambar 3. 7 Tampak Samping Desain 3D Prototype PLTS.

3.5.2 Rangkaian Pengukuran Tegangan Keluaran

Rangkaian pengukuran tegangan keluaran dapat dilihat pada Gambar 3.8, pengukuran tegangan dilakukan menggunakan multimeter.



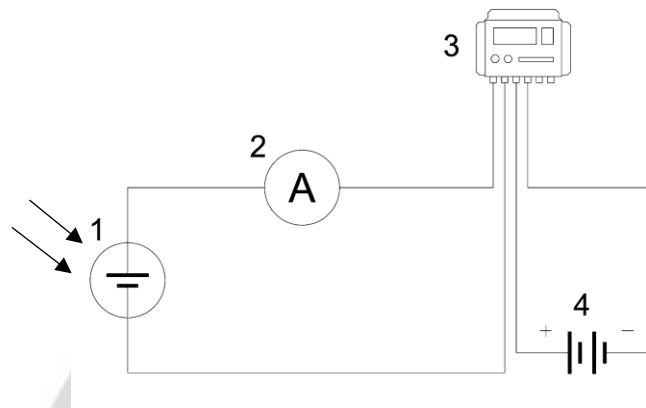
Gambar 3. 8 Rangkaian Pengukuran Tegangan Keluaran.

Keterangan :

1. Modul Surya
2. Multimeter
3. *Solar Charge Controller*
4. Baterai

3.5.3 Rangkaian Pengukuran Arus Keluaran

Rangkaian pengukuran arus keluaran dapat dilihat pada Gambar 3.9, pengukuran arus dilakukan menggunakan multimeter.



Gambar 3. 9 Rangkaian Pengukuran Arus Keluaran.

Keterangan :

1. Modul Surya
2. Multimeter
3. *Solar Charge Controller*
4. Baterai.

3.6 Rencana Waktu Penelitian

Agar pelaksanaan penelitian ini terstruktur dan sesuai target yang ingin dicapai, maka disusun rencana penelitian yang dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Tabel 3. 2 Rencana Pelaksanaan Penelitian.

No	Rencana Kegiatan	Februari-Juni 2026																			
		Februari				Maret				April				Mei				Juni			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Studi Literatur dan Pembuatan Proposal																				
2	Persiapan Alat dan Bahan Penelitian																				
3	Pembuatan prototipe PLTS dan Perancangan Simulasi																				
4	Pengujian Prototipe dan Simulasi																				
5	Analisis Hasil Pengujian																				
6	Finalisasi Penelitian																				
7	Persiapan Ujian Sidang Tugas Akhir																				
8	Ujian Sidang Tugas Akhir																				