

BAB II **TINJAUAN PUSTAKA**

2.1 Energi Terbarukan

Energi terbarukan mencakup berbagai teknologi yang memanfaatkan sumber daya alami yang tersedia secara luas. Contohnya, energi matahari menggunakan teknologi panel fotovoltaik untuk mengubah sinar matahari menjadi listrik. Teknologi ini terus berkembang dengan peningkatan efisiensi panel dan pengurangan biaya produksi, yang membuatnya semakin kompetitif dengan sumber energi konvensional (Singh, 2023). Energi angin juga merupakan komponen kunci dari strategi energi terbarukan, di mana desain turbin terus disempurnakan untuk meningkatkan output energi dan memanfaatkan potensi angin di daerah pedalaman maupun lepas pantai (Ilojianya et al., 2024).

Manfaat energi terbarukan mencakup pengurangan ketergantungan pada bahan bakar fosil, peningkatan ketahanan energi, dan dampak lingkungan yang lebih kecil. Namun, tantangan besar meliputi fluktuasi output energi karena ketergantungan pada kondisi cuaca, biaya investasi awal yang tinggi, dan kebutuhan untuk mengintegrasikan energi terbarukan ke dalam jaringan listrik secara efisien (Hasanov et al., 2021).

Teknologi energi terbarukan terus berkembang, mencakup inovasi dalam material fotovoltaik, pengembangan sistem penyimpanan energi, dan integrasi dengan jaringan listrik pintar. Teknologi berbasis kecerdasan buatan juga menawarkan solusi baru untuk memaksimalkan efisiensi energi dan meminimalkan dampak negatif dari intermitensi sumber energi terbarukan (Li & Hu, 2022).

2.2 Solar Cell

Solar cell atau sel surya adalah perangkat semikonduktor yang mengubah energi cahaya menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Teknologi ini menjadi solusi penting untuk kebutuhan energi terbarukan global, yang bertujuan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan emisi karbon. Solar cell bekerja berdasarkan prinsip efek fotovoltaik, di mana cahaya yang jatuh pada permukaan semikonduktor menghasilkan pasangan elektron-hole. Elektron bebas yang terbentuk kemudian bergerak ke arah elektroda, menghasilkan arus listrik. Proses ini sangat bergantung pada material semikonduktor, seperti silikon, yang digunakan dalam struktur solar cell (Shah, 2020)



Gambar 2.1 Panel Surya

Sumber: <https://www.sanspower.com/jenis-jenis-panel-surya-yang-bagus.html>

2.3 Solar Cell Tipe Polikristalin

Solar cell tipe polikristalin adalah salah satu teknologi yang digunakan secara luas dalam sistem photovoltaic (PV) karena biayanya yang relatif lebih rendah dibandingkan monokristalin. Material polikristalin terdiri dari banyak butir (grain) kristal kecil yang digabungkan dalam satu wafer silikon. Proses pembuatannya lebih murah karena tidak memerlukan kontrol kualitas yang ketat selama proses kristalisasi. Meskipun efisiensinya umumnya lebih rendah dibandingkan monokristalin, solar cell

ini tetap kompetitif dalam aplikasi komersial, terutama untuk instalasi atap rumah dan pembangkit listrik skala besar. Rata-rata efisiensi polikristalin berkisar antara 13-15%, tergantung pada kualitas material dan kondisi operasi.

Salah satu tantangan utama dalam solar cell polikristalin adalah keberadaan grain boundaries, yang berfungsi sebagai pusat rekombinasi pembawa muatan, mengurangi efisiensi perangkat. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa penggunaan lapisan pasivasi dapat mengurangi dampak negatif grain boundaries dengan mengurangi rekombinasi nonradiative (Park dan Walsh, 2020). Selain itu, inovasi seperti penggunaan kristal fotonik (photonic crystal) telah meningkatkan efisiensi dengan mengoptimalkan jalur cahaya di dalam perangkat, menghasilkan peningkatan efisiensi hingga 25% (Zabihi Mohsen, 2020).

Contoh panel surya jenis polikristalin ditunjukkan pada Gambar 2.2 berikut :



Gambar 2.2 solar cell tipe polikristalin

Sumber: <https://www.sanspower.com/jenis-jenis-panel-surya-yang-bagus.html>

2.4 Efficiency Solar Cell

Efisiensi solar cell didefinisikan sebagai rasio energi listrik yang dihasilkan terhadap energi cahaya yang diterima. Efisiensi ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk bahan semikonduktor, desain perangkat, dan kondisi lingkungan seperti

intensitas cahaya dan suhu. Efisiensi ideal solar cell ditentukan oleh batas Shockley-Queisser, yang menunjukkan bahwa efisiensi maksimum untuk solar cell silikon single-junction adalah sekitar 33.7%. Namun, teknologi saat ini masih berusaha mendekati batas teoretis ini. (Siagian et al., 2025).

2.5 Algoritma K-Means

K-means adalah algoritma pembelajaran mesin yang populer untuk clustering data. Algoritma ini bertujuan untuk membagi dataset ke dalam sejumlah cluster yang telah ditentukan sebelumnya dengan meminimalkan variansi internal cluster. K-means memulai dengan memilih pusat cluster (centroid) secara acak, kemudian iterasi dilakukan dengan mengelompokkan setiap data ke cluster terdekat berdasarkan jarak Euclidean. Proses ini berlanjut hingga tidak ada perubahan signifikan pada posisi centroid (Chen et al., 2024).

Salah satu keunggulan utama K-means adalah kesederhanaan dan efisiensinya dalam mengelompokkan data besar. Dalam konteks solar cell, algoritma ini digunakan untuk menganalisis data operasional, seperti intensitas cahaya, suhu, dan arus listrik, untuk mengidentifikasi pola efisiensi (Chen et al., 2024).

Namun, K-means memiliki beberapa keterbatasan, seperti ketergantungan pada inisialisasi centroid awal dan sulit menangani dataset dengan distribusi non-sferis. Untuk mengatasi ini, algoritma seperti K-means++ telah diperkenalkan untuk meningkatkan akurasi dan konsistensi hasil clustering (Chen et al., 2024).

Berikut ini langkah-langkah dari algoritma untuk melakukan K-Means clustering:

1. Pilih K buah titik centroid secara acak.

2. Kelompokkan data sehingga terbentuk K buah cluster dengan titik centroid dari setiap cluster merupakan titik centroid yang telah dipilih sebelumnya.
3. Perbaharui nilai titik centroid.
4. Ulangi langkah 2 dan 3 sampai nilai dari titik centroid tidak lagi berubah.

Proses pengelompokan data ke dalam suatu cluster dapat dilakukan dengan cara menghitung jarak terdekat dari suatu data ke sebuah titik centroid. Rumus untuk menghitung jarak tersebut adalah: (Chen et al., 2024).

$$d(x_i, x_j) = (|x_{i1} - x_{j1}|^g + |x_{i2} - x_{j2}|^g + \dots + |x_{ip} - x_{jp}|^g)^{1/g}$$

Dengan:

$g = 1$, untuk menghitung jarak manhattan

$g = 2$, untuk menghitung jarak euclidean

$g = 3$, untuk menghitung jarak chebychev

x_i, x_j adalah dua buah data yang akan dihitung jaraknya

p = dimensi dari sebuah data

Sedangkan untuk pembaharuan suatu titik centroid dapat dilakukan dengan rumus berikut.

$$\mu_k = \frac{1}{N_k} \sum_{q=1}^{N_k} x_q$$

μ_k = titik centroid dari cluster ke-K

N_k = banyaknya data pada cluster ke-K

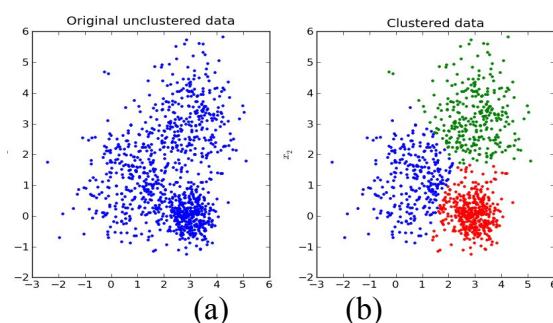
X_k = data ke-q pada cluster ke-K

2.6 Clustering

Clustering adalah teknik pembelajaran mesin yang digunakan untuk mengelompokkan data tanpa label berdasarkan kesamaan fitur. Metode ini sering digunakan dalam analisis data eksploratif untuk menemukan pola tersembunyi dalam dataset besar. Clustering dapat dibagi menjadi beberapa jenis, seperti clustering partisi (misalnya, K-means), hierarki, dan density-based (misalnya, DBSCAN) (Shermatova et al., 2024).

Dalam konteks energi terbarukan, clustering digunakan untuk memisahkan data efisiensi solar cell berdasarkan variabel lingkungan seperti intensitas cahaya dan suhu. Dengan menggunakan clustering, pola konsumsi energi dan faktor penentu efisiensi dapat diidentifikasi, memungkinkan optimasi lebih lanjut (Shermatova et al., 2024).

Ada dua tahap utama dalam melakukan clustering yaitu memutuskan apakah akan menentukan jumlah pengelompokan dan memilih algoritma yang tepat. Saat melakukan analisis clustering, dua pendekatan utama dapat digunakan yaitu hard clustering dan soft clustering. Hasil clustering yang efektif akan menghasilkan data yang menunjukkan tingkat kesamaan yang tinggi dalam satu cluster, dan sebaliknya juga berlaku. (Rohmah & Saputro, 2020).



Gambar 2.3 (a) menggambarkan data sebelum di cluster dan (b) sesudah di cluster

Sumber: <https://nzlul.medium.com/unsupervised-learning-k-means-clustering-using-python-case-online-retail-dataset-df7d18599a52>

2.7 Metode Elbow

Elbow Method bertujuan untuk menemukan titik di mana penambahan jumlah klaster tidak lagi memberikan peningkatan signifikan dalam kualitas clustering. Cara kerjanya adalah dengan memplot nilai Sum of Squared Errors (SSE) terhadap jumlah klaster (k). Metode Elbow melibatkan perhitungan *Sum of Squared Errors* (SSE) untuk berbagai nilai k . SSE mengukur seberapa jauh titik data berada dari centroid cluster mereka. Semakin kecil nilai SSE, semakin padat cluster yang terbentuk. Plot SSE terhadap k menunjukkan titik "siku" atau "lutut" di mana penurunan SSE mulai melambat secara signifikan. Titik ini sering dianggap sebagai k yang optimal karena menambahkan lebih banyak cluster setelah titik ini tidak memberikan banyak peningkatan dalam menjelaskan variansi data, namun meningkatkan kompleksitas model (Sutantri et al., 2025).

2.8 Silhouette Score

Silhouette score adalah metode yang mengukur seberapa baik suatu titik data ditempatkan dalam klaster tertentu dengan membandingkan jarak intra-klaster (jarak dalam klaster) dan inter-klaster (jarak antar klaster). Silhouette Score mengukur seberapa mirip sebuah objek dengan klaster sendiri (kohesi) dibandingkan dengan klaster tetangga (separasi). Nilai Silhouette Score berkisar antara -1 hingga 1, di mana nilai yang lebih tinggi menunjukkan klaster yang lebih baik dan terdefinisi dengan jelas. Nilai 1 menunjukkan klaster yang sangat padat dan terpisah, 0 menunjukkan klaster yang tumpang tindih, dan -1 menunjukkan bahwa objek mungkin telah ditetapkan ke klaster yang salah (Sutantri et al., 2025)

2.9 Pyhton

Python adalah salah satu bahasa pemrograman yang sangat populer saat ini. Bahasa ini dikembangkan oleh Guido van Rossum dan pertama kali dirilis pada tahun 1991. Python memiliki beragam kegunaan, termasuk pengembangan web (server-side), pengembangan perangkat lunak atau aplikasi, pemecahan persamaan matematika, pembuatan skrip sistem, dan pemrograman mikrokontroler (Micro Python).

Beberapa fungsi utama Bahasa pemograman Python dapat digunakan di server untuk membuat aplikasi web, bekerja sama dengan perangkat lunak lain untuk mengatur alur kerja, terhubung ke sistem basis data, membaca dan memodifikasi file, menangani data dalam skala besar serta melakukan perhitungan matematika yang kompleks. Selain itu, Python memungkinkan pembuatan prototipe secara cepat maupun pengembangan perangkat lunak yang siap digunakan di produksi.(Alfian Ma'arif, 2020)

Python adalah bahasa pemrograman yang sangat digunakan dalam analisis data dan pembelajaran mesin. Pustaka seperti Scikit-learn dan Pandas memungkinkan implementasi algoritma clustering seperti K-means untuk analisis solar cell. Visualisasi menggunakan Matplotlib dapat memberikan wawasan tambahan tentang distribusi efisiensi energi. (Chen, 2020)

2.10 Penelitian Terdahulu

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1	Benmouiza, K. &	Hybrid K-Means	Metode hybrid memanfaatkan

No.	Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
	Cheknane,	Approach for Hourly	K-Means untuk
	A. (2020)	Solar Radiation Forecasting	mengelompokkan data radiasi jam-per-jam sebelum diprediksi dengan model regresi. Hasilnya meningkatkan akurasi prakiraan radiasi hingga 15% dibanding pendekatan konvensional, yang secara langsung membantu prediksi efisiensi dan perencanaan beban PV.
2	Bhola, P. et al. (2020)	Clustering-Based Computation of Degradation Rate for Photovoltaic Systems	K-Means digunakan untuk mengelompokkan data historis cuaca dan produksi daya untuk menghitung laju degradasi modul PV. Hasil menunjukkan ketepatan perhitungan laju degradasi tahunan $\pm 0,3\%$ dibanding pengukuran lapangan, sehingga metode ini efektif untuk estimasi umur ekonomis modul tanpa inspeksi

No.	Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
			fisik.
3	Ryu, H. et al. (2024)	K-Means Clustering for Fault Detection in Large Photovoltaic Plants	Peneliti menggabungkan sinyal arus dan tegangan real-time dari ribuan modul PV dan menggunakan K-Means untuk mendekripsi fault seperti shading tidak merata dan degradasi sel. Algoritma mampu mengurangi false alarm sebesar 40% dibandingkan metode rule-based dan dapat diintegrasikan langsung ke sistem SCADA pembangkit.
4	Fan, T. et al. (2022)	Automatic Micro-Crack Detection of Polycrystalline Solar Cells in Industrial Scenes	Fokus pada sel surya polikristalin, penelitian ini mengombinasikan pemrosesan citra resolusi tinggi dan K-Means untuk menyoroti micro-crack yang tak terlihat mata. Metode tersebut menurunkan rasio kesalahan deteksi hingga

No.	Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
			<3% dan meningkatkan efisiensi produksi karena mampu mengidentifikasi sel cacat sebelum tahap laminasi, yang bila terlewat akan menurunkan efisiensi listrik modul secara signifikan.
5	Winati, F. D. et al. (2023)	Implementation of Clustering Analysis on Solar Panels	Studi kasus ini menerapkan K-Means pada data tegangan, arus, dan temperatur panel surya di lingkungan tropis Indonesia. Hasil analisis menunjukkan pembagian cluster yang jelas antara kondisi operasi optimal, sub-optimal, dan anomali. Pendekatan ini memudahkan deteksi deviasi kinerja akibat suhu tinggi dan kelembapan, sekaligus menjadi alat pendukung keputusan untuk pemeliharaan berbasis data.

No.	Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
6	Farghaly, S. R. M. (2022)	Classification of Solar Variability Using K-Means for PV Performance Evaluation	Dengan memanfaatkan data indeks variabilitas radiasi (clearness index), penelitian ini mengelompokkan kondisi cuaca harian menjadi beberapa kelas yang mewakili pola langit cerah, berawan parsial, dan mendung. Hasilnya memperlihatkan bahwa perbedaan cluster sangat memengaruhi faktor kinerja (Performance Ratio) modul PV, serta dapat dijadikan dasar penjadwalan pemeliharaan dan perencanaan kapasitas penyimpanan energi.
7	Liang, L. et al. (2021)	Status Evaluation Method for Arrays in Large-Scale PV Plants Based on K-Means Clustering	Penelitian ini mengimplementasikan K-Means pada data arus dan tegangan dari ratusan string panel di pembangkit PV skala utilitas. Hasil pengelompokan

No.	Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
			<p>memisahkan kondisi array menjadi tiga kategori: normal, under-performing, dan fault. Penerapan metode ini memungkinkan deteksi dini kegagalan modul dengan tingkat keberhasilan >90% dan mempersingkat waktu troubleshooting lapangan, sehingga meningkatkan efisiensi operasi dan menekan biaya pemeliharaan.</p>
8	Looney, E. E. et al. (2021)	Representative Identification of Spectra and Environments (RISE) Using K-Means for PV Data	<p>Studi ini menggunakan K-Means untuk memilih spektrum radiasi dan kondisi atmosfer representatif dari dataset PV yang sangat besar. Dengan mengelompokkan data spektral menjadi cluster khas, peneliti dapat mengurangi kompleksitas simulasi performa modul PV hingga</p>

No.	Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
			60% tanpa mengorbankan akurasi prediksi output energi. Metode ini sangat membantu perancang sistem dalam menilai kinerja modul di berbagai lokasi geografis.
9	Attia, E. A. et al. (2023)	Instant Testing and Non-contact Diagnosis for Photovoltaic Modules Using K-Means Clustering	Peneliti menggabungkan citra termografi inframerah dan algoritma K-Means untuk melakukan pengujian cepat tanpa kontak fisik pada modul PV. Metode ini berhasil mengelompokkan area sel surya yang mengalami anomali termal—seperti hot-spot, retak halus, dan delaminasi—with akurasi di atas 95%. Hasilnya menunjukkan K-Means mampu menekan waktu inspeksi hingga 70% dibandingkan metode manual sekaligus meningkatkan keandalan

No.	Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
			pemeliharaan preventif.
10	Munshi, A. A. et al. (2020)	Photovoltaic Power Pattern Clustering Based on K-Means	Penelitian ini mengekstrak pola output daya harian dan musiman dari sistem PV besar. K-Means berhasil mengidentifikasi lima pola utama yang berkorelasi dengan kondisi meteorologi, memberikan dasar bagi perencanaan penyimpanan energi dan strategi grid integration.