

Evaluasi Degradasi dan Performa Panel Surya Multikristal di Kondisi Iklim Tropis dengan Translasi IEC 60891

Imam Faried Assalam*¹, Umar Muhammad², Irvawasnyah³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Listrik, Politeknik Bosowa

Jl. Kapasa Raya No.23 Kec. Tamalanrea Kota Makassar

*Email: imamfariedassalam@gmail.com

Abstrak

Setiap tahun, panel surya mengalami penurunan produksi, sehingga diperlukan evaluasi degradasi dan performa panel surya multikristal di kondisi iklim tropis. Penelitian ini menggunakan SEAWARD PV 200 (Complete Kit) untuk mengukur data keluaran panel surya, yang kemudian dianalisis menggunakan metode translasi sesuai IEC 60891 Procedure 1 untuk menentukan Standard Test Conditions (STC). Hasil translasi menunjukkan tingkat degradasi panel surya sebesar $\pm 1,16\%$ per tahun. Evaluasi performa menggunakan metode regresi linier mengungkap bahwa iklim tropis yang meningkatkan temperatur panel surya memperbesar persentase degradasi, di mana setiap kenaikan suhu sebesar $1\text{ }^\circ\text{C}$ menyebabkan peningkatan degradasi sekitar $\pm 0,15\%$

Kata Kunci: Degradasi, Standar IEC 60891, Regresi Linier, Multikristalin, Kinerja

Abstract

Every year, solar panels experience a decline in production, so it is necessary to evaluate the degradation and performance of multicrystalline silicon (mc-Si) solar panels in tropical climate conditions. This research uses SEAWARD PV 200 (Complete Kit) to measure solar panel output data, which is then analyzed using the translation method according to IEC 60891 Procedure 1 to determine Standard Test Conditions (STC). The translational results showed a solar panel degradation rate of $\pm 1.16\%$ per year. Performance evaluation using the linear regression method revealed that a tropical climate that increases the temperature of the solar panel increases the percentage of degradation, where every $1\text{ }^\circ\text{C}$ increase in temperature causes an increase in degradation of approximately $\pm 0.15\%$.

Keywords: Degradation, IEC 60891, Linier Regression, Multicrystalline, Performance

1. Pendahuluan

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk memenuhi kebutuhan energi dunia secara berkelanjutan. Pemanfaatan panel surya sebagai teknologi utama dalam pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) telah berkembang pesat, terutama di negara-negara dengan intensitas radiasi matahari tinggi, seperti yang ditemukan di wilayah tropis. Panel surya multikristal (multicrystalline silicon, mc-Si) menjadi salah satu jenis yang paling banyak digunakan karena efisiensi yang baik, biaya produksi yang relatif rendah, serta ketersediaan material yang melimpah [1].

Namun, kinerja panel surya tidak hanya ditentukan oleh desain dan teknologi manufaktur, tetapi juga oleh kondisi lingkungan di mana panel tersebut beroperasi. Wilayah dengan iklim tropis, seperti Indonesia, menghadirkan tantangan unik bagi teknologi panel surya.

Faktor-faktor seperti suhu tinggi, kelembapan ekstrem, curah hujan intens, serta paparan debu, kotoran, dan jamur dapat menyebabkan degradasi material pada panel surya, sehingga memengaruhi performa jangka panjangnya [2]. Degradasi ini, jika tidak dikendalikan, dapat mengurangi efisiensi konversi energi dan memperpendek masa pakai sistem surya.

Selain itu, faktor ketidakpastian dalam pengukuran performa panel surya sering kali menjadi kendala dalam evaluasi teknis dan analisis data. Ketidakpastian ini dapat berasal dari berbagai sumber, seperti variabilitas alat ukur, kondisi lingkungan yang dinamis, serta fluktuasi dalam metode pengambilan data [3]. Oleh karena itu, evaluasi performa dan degradasi panel surya di kondisi tropis memerlukan pendekatan keseragaman melalui translasi *Standard Test Condition* (STC) untuk mempertimbangkan aspek teknis dan variasi dalam proses pengukuran.

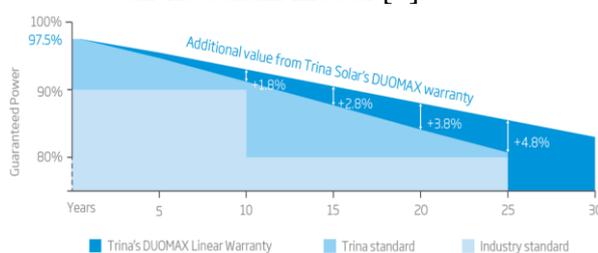
1.1 Spesifikasi dan Kondisi Penelitian

1. Degradasi Panel Surya Multikristal

Degradasi pada panel surya merujuk pada penurunan kemampuan modul dalam mengonversi energi matahari menjadi energi listrik seiring waktu. Panel surya multikristal (mc-Si), yang merupakan salah satu jenis paling umum digunakan, mengalami degradasi akibat berbagai faktor lingkungan dan mekanisme internal material [4]. Tingkat degradasi sering dinyatakan dalam bentuk degradation rate, yang diukur sebagai persentase penurunan daya keluaran per tahun (%/tahun).

Beberapa mekanisme degradasi utama pada panel surya multikristal adalah:

- Degradasi fotolitik (*Light-Induced Degradation*, LID): Terjadi pada tahap awal eksposur terhadap cahaya matahari akibat rekombinasi pembawa muatan di permukaan lapisan silikon [5].
- Degradasi termal: Dipicu oleh siklus panas dan dingin yang menyebabkan tegangan termal pada material modul [6].
- Degradasi akibat kelembapan: Paparan kelembapan tinggi dapat menyebabkan korosi konektor listrik, delaminasi lapisan, dan penetrasi uap air ke dalam modul [7].



Gambar 1 Persentase degradasi panel surya per tahun (Trina Solar)

Berdasarkan Gambar 1, panel surya yang akan diteliti memiliki standar degradasi di awal tahun sebesar 2,5% dan tahun-tahun berikutnya sebesar 0,5% dengan jangka waktu sampai 30

tahun yang masih mampu memproduksi daya sebesar lebih dari 80%.

Pada Tabel I ditampilkan koefisien pengaruh temperatur panel surya terhadap nilai keluaran arus, tegangan, dan daya. Temperatur sangat berpengaruh terhadap nilai keluaran panel surya karena akan menentukan apakah produksi yang dihasilkan lebih tinggi atau lebih rendah.

Tabel 1 Koefisien pengaruh temperatur

Koefisien	Nilai
Koefisien Temperatur P_{mp}	-0,41%/K
Koefisien Temperatur V_{oc}	-0,32%/K
Koefisien Temperatur I_{sc}	+0.05%/K

2. Kondisi Iklim Tropis

Indonesia, sebagai negara beriklim tropis yang terletak di garis khatulistiwa, menerima intensitas sinar matahari yang tinggi sepanjang tahun, menjadikannya lokasi potensial untuk pemanfaatan energi surya. Namun, kondisi iklim tropis yang khas, seperti suhu lingkungan yang tinggi, curah hujan yang signifikan, dan kelembaban udara yang tinggi, dapat mempengaruhi performa panel surya.

Suhu lingkungan yang tinggi dapat menyebabkan peningkatan suhu permukaan panel surya, yang berdampak negatif pada efisiensinya. Panel surya berbahan silikon, misalnya, memiliki koefisien suhu daya sekitar $-0,5\%/^{\circ}\text{C}$, yang berarti setiap kenaikan suhu 1°C dapat mengurangi output daya hingga 0,5% [8]. Selain itu, kelembaban tinggi dan curah hujan yang sering dapat menyebabkan penumpukan debu dan kotoran pada permukaan panel, mengurangi penyerapan sinar matahari dan menurunkan efisiensi konversi energi [9].

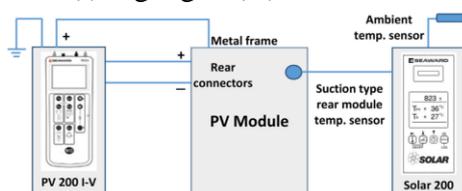
Kondisi iklim tropis memiliki karakteristik unik yang memengaruhi laju degradasi panel surya multikristal:

- Suhu tinggi: Suhu operasi yang tinggi dapat menurunkan efisiensi modul karena peningkatan resistansi internal [10].
- Kelembapan ekstrim: Wilayah tropis sering memiliki kelembapan udara di atas 80%, yang mempercepat korosi dan delaminasi [11].
- Paparan sinar UV: Intensitas sinar ultraviolet yang tinggi dapat menyebabkan fotodegradasi pada material pelindung modul, seperti kaca atau lapisan EVA (ethylene-vinyl acetate) [12].

Degradasi panel surya di iklim tropis lebih tinggi dibandingkan di wilayah subtropis atau beriklim sedang. Rata-rata degradasi panel multikristal di iklim tropis berkisar antara 0,8% hingga 1,5% per tahun, tergantung pada kualitas material dan tingkat eksposur terhadap faktor lingkungan [7]. Angka ini lebih tinggi dibandingkan dengan degradasi rata-rata global yang berada di kisaran 0,5% hingga 1% per tahun [13].

3. Pengukuran Kurva I-V

Dalam pengoperasiannya, performa panel surya sangat dipengaruhi oleh parameter atau kondisi iklim setempat (temperatur lingkungan dan radiasi matahari), temperatur sel panel surya, dan lain sebagainya [14]. Parameter tersebut akan menentukan spesifikasi keluaran panel surya yang ditampilkan melalui kurva karakteristik arus (I)-tegangan (V) atau kurva I-V.



Gambar 2 Diagram proses pengukuran Kurva I-V

Salah satu alat yang dapat mengukur kurva karakteristik I-V adalah SEAWARD PV200 (Complete Kit) seperti pada Gambar 2. Alat ini dapat mengukur semua nilai-nilai keluaran panel surya seperti arus, tegangan, daya, serta *fill factor* [15], untuk lebih lengkapnya dapat dilihat pada tabel II. Menurut standar IEC 61829:2015, pada saat melakukan pengukuran, nilai iradiasi harus minimal 700 W/m^2 sehingga dibutuhkan intensitas cahaya yang cukup tinggi pada siang hari.

4. Standard Test Conditions (STC)

STC dalam panel surya mengacu pada kondisi standar yang digunakan untuk mengukur kinerja panel surya. STC adalah standar yang ditetapkan oleh industri panel surya untuk membandingkan kinerja panel surya secara konsisten [16][17][18]. Semua data pengukuran kurva karakteristik akan diterjemahkan ke dalam nilai STC.

Tabel 2 Spesifikasi STC nominal panel surya

Parameter	Nilai
Daya maksimum (P_{mp})	325 Wp
Toleransi daya keluaran	0/+5 W
Arus hubung singkat (I_{sc})	9,27 A
Tegangan sirkuit terbuka (V_{oc})	45,6 V
Tegangan maksimum (V_{mp})	37,5 V
Arus maksimum (I_{mp})	8,69 A
Efisiensi panel surya	16,6 %
Toleransi pengukuran	$\pm 3 \%$

Kondisi standar ini terdiri dari beberapa parameter yang ditentukan secara khusus yaitu (1) Radiasi matahari 1.000 W/m^2 (2) Temperatur panel surya 25°C & (3) Massa udara 1,5 AM. Nilai nominal STC (nilai STC saat tidak terjadi degradasi) pada penelitian panel surya ini terdapat pada Tabel II.

2. Metode

2.1 Pengambilan data

Pada Gambar 3 dan Gambar 4 dilakukan proses pengambilan data di salah satu Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang sudah beroperasi selama 3 tahun di Provinsi Sulawesi Utara berupa nilai-nilai keluaran maksimum pada panel surya dengan melakukan

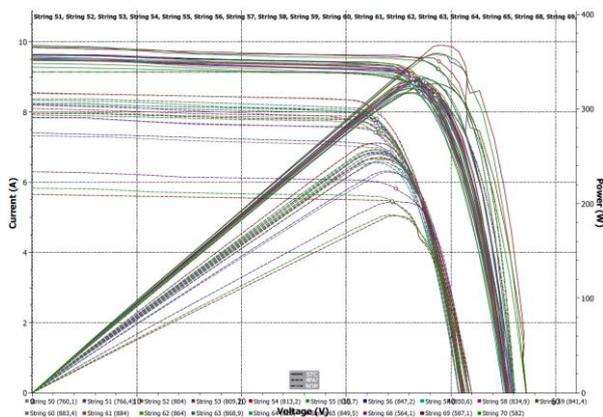
pengukuran secara offline menggunakan alat ukur SEAWARD PV 200 (Complete Kit). Hasil pengukuran tersebut berupa data csv yang dikonversi menjadi report dalam bentuk pdf. Objek yang digunakan adalah panel surya berjenis multikristal dengan daya produksi 325 Wp sebanyak 198 panel surya. Pada Gambar 6 ditampilkan flowchart metode penelitian secara lengkap.



Gambar 3 Proses pengukuran Kurva I-V



Gambar 4 Hasil pengukuran dan proses seleksi Kurva I-V



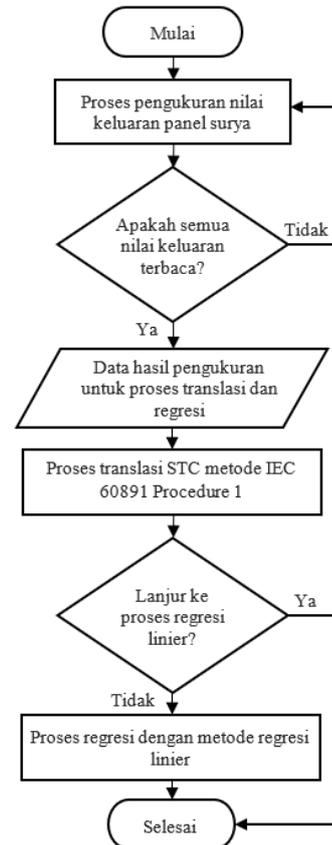
Gambar 5 Kurva I-V hasil pengukuran

Selanjutnya dilakukan proses seleksi atau pemilihan hasil pengukuran data keluaran pada Gambar 5. Data yang dipilih yaitu data hasil pengukuran yang terdapat semua nilai-nilai indikator maksimum. Seleksi penting dilakukan untuk menghasilkan data yang akurat karena saat pengukuran berlangsung biasanya terdapat kekeliruan pembacaan data seperti hilangnya

data radiasi matahari, kestabilan radiasi matahari tidak sesuai standar, suhu panel surya tidak terbaca, maupun alat ukur yang digunakan terlepas dari objek pengukuran.

2.2 Proses Translasi IEC 60891

Standar IEC 60891 digunakan untuk menentukan prosedur koreksi data keluaran panel surya ke kondisi referensi tertentu, seperti *Standard Test Conditions (STC)*. Koreksi ini bertujuan untuk menghilangkan pengaruh variasi temperatur modul dan iradiasi yang terjadi selama pengukuran. IEC 60891 *Procedure 1* dalam standar ini mencakup langkah-langkah koreksi berdasarkan hubungan linear antara parameter keluaran panel surya dan kondisi lingkungan. Prosedur ini dijelaskan secara rinci sebagai berikut [16]:



Gambar 6 Flowchart proses penelitian

2.3 Tahapan Penelitian

1. Persiapan Data Awal

- Radiasi matahari (G_1): Diukur dalam satuan W/m^2
- Temperatur panel surya (T_1): Diukur dalam $^{\circ}C$
- Parameter keluaran panel surya: Data arus (I_1) dan tegangan (V_1)

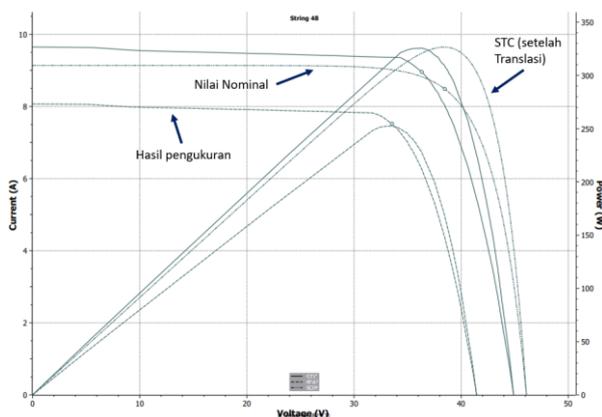
2. Identifikasi Parameter Referensi
 - a. Radiasi matahari (G_2): 1000 W/m²
 - b. Temperatur panel surya (T_2): 25°C
3. Penentuan Koefisien Energi
 - a. Koefisien temperatur I_{sc} (α): A/°C
 - b. Koefisien temperatur V_{oc} (β): V/°C
 - c. Resistansi seri (R_s): Ω
 - d. Faktor koreksi kurva (k): $\Omega / ^\circ C$
4. Proses Translasi
 - a. Translasi nilai arus (I_2)

$$I_2 = I_1 + I_{sc} \left(\frac{G_2}{G_1} - 1 \right) + \alpha (T_2 - T_1) \quad (1)$$

- b. Translasi nilai tegangan (V_2)

$$V_2 = V_1 - R_s(I_2 - I_1) - kI_2(T_2 - T_1) + \beta(T_2 - T_1) \quad (2)$$

Hasil translasi nilai arus dan tegangan pada rumus (1) dan (2) tersebut akan dibandingkan dengan nilai nominal STC dari panel surya sehingga dapat ditentukan apakah panel surya tersebut mengalami degradasi atau tidak mengalami degradasi.



Gambar 7 Kurva I-V hasil translasi

Pada Gambar 7 ditampilkan perbedaan hasil pengukuran, nilai nominal, dan nilai STC setelah translasi. Dalam grafik tersebut nilai arus dan tegangan hasil pengukuran tidak sesuai atau jauh dibawah nilai nominal dikarenakan kondisi radiasi matahari saat pengukuran tidak mencapai 1.000 W/m². Sehingga untuk menyamakan semua data ukur dilakukanlah proses translasi STC.

2.4 Regresi Linier

Regresi linier adalah metode statistik yang digunakan untuk memodelkan hubungan antara satu variabel dependen (Y) dan satu atau

lebih variabel independen (X). Dalam konteks penelitian, regresi linier sederhana atau regresi linier berganda sering digunakan untuk memahami hubungan kuantitatif antar variabel, memprediksi nilai keluaran, atau mengidentifikasi pengaruh variabel independen terhadap variabel dependen [19].

1. Model Regresi Linier

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon \quad (3)$$

- a. Y: Variabel dependen
- b. X: Variabel independen
- c. β_0 : Intersep (nilai Y ketika X = 0)
- d. β_1 : Koefisien regresi (kemiringan garis regresi)
- e. ϵ : Error residual (penyimpangan antara nilai aktual dan nilai prediksi)

2. Asumsi Regresi Linier

- a. Data harus mencakup variabel independen (X) dan variabel dependen (Y)
- b. Data bebas dari outlier atau pengaruh yang dapat mendistorsi analisis
- c. Hubungan antara X dan Y adalah linier
- d. Residual berifat independent
- e. Residual berdistribusi normal dengan rata-rata nol
- f. Variansi residual adalah konstan

3. Estimasi Parameter

Koefisien β_0 dan β_1 dihitung menggunakan metode *Ordinary Least Squares* (OLS), yang meminimalkan jumlah kuadrat residual (ϵ^2) [20][21]:

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (4)$$

$$\beta_0 = \bar{Y} - \beta_1 \bar{X} \quad (5)$$

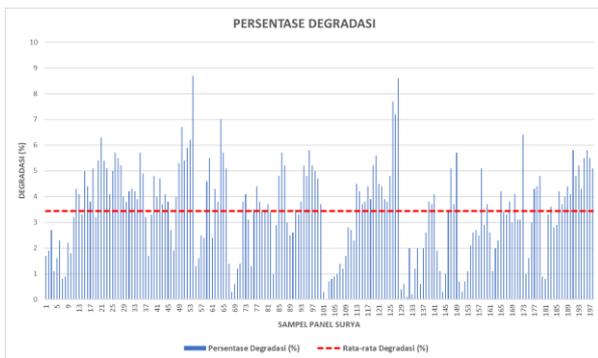
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil

Pada bagian ini ditampilkan hasil pengukuran parameter panel surya pada kurva I-V yang menjadi data masukan untuk

mengimplementasikan metode translasi STC berdasarkan IEC 60891 Procedure 1 dan metode regresi linier. Hasil dari implementasi kedua metode tersebut akan disederhanakan melalui grafik untuk menganalisa degradasi dan performa dari panel surya tersebut.

1. Hasil Persentase Degradasi

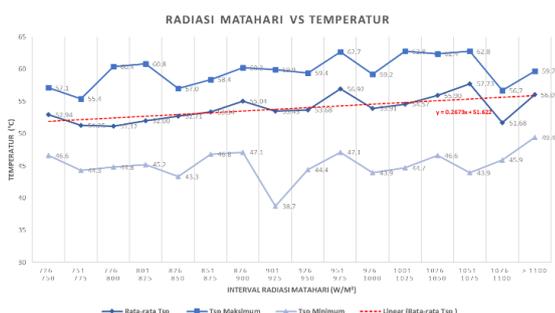


Gambar 8 Persentase degradasi panel surya

Pada Gambar 3 Gambar 8 menunjukkan persentase degradasi sangat bervariasi di antara sampel panel surya, dengan nilai tertinggi mencapai hampir 10% dan nilai terendah di bawah 1%. Rata-rata degradasi (digambarkan oleh garis merah) berada di sekitar 3,5%. Ini menunjukkan bahwa degradasi panel surya multikristalin di lingkungan tropis adalah moderat dalam tiga tahun operasi di mana panel surya mengalami degradasi sebesar ±1,16% per tahun.

Sebagian besar panel memiliki degradasi di sekitar nilai rata-rata, tetapi ada beberapa panel dengan degradasi yang jauh lebih tinggi, yang kemungkinan disebabkan oleh faktor seperti kualitas material, pemasangan, atau kondisi operasional ditambah dengan kondisi iklim tropis seperti tingkat kelembaban tinggi, suhu panas, dan paparan sinar UV intensif dapat menjadi penyebab utama degradasi material panel surya.

2. Radiasi Matahari VZ Temperature

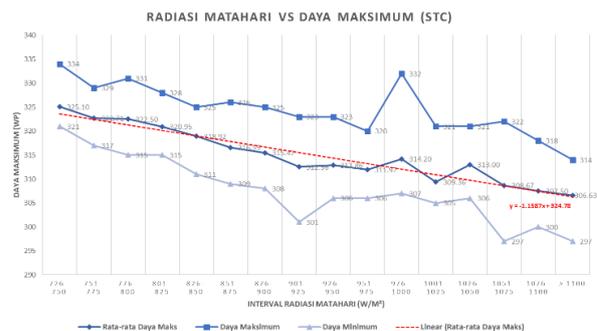


Gambar 9 Grafik hubungan antara radiasi matahari dengan temperatur

Grafik pada Gambar 9 menunjukkan korelasi antara radiasi matahari dan temperatur. Semakin tinggi radiasi matahari yang diterima maka semakin tinggi temperatur panel surya, baik dari nilai rata-rata, maksimum, maupun minimum.

Grafik regresi linier memperlihatkan kecenderungan temperatur meningkat secara linier dengan peningkatan radiasi matahari. Korelasi antara radiasi matahari dan temperatur menghasilkan persamaan regresi linier $y=0,2673x+51,622$, yang menunjukkan bahwa setiap peningkatan 1 W/m^2 radiasi matahari menyebabkan kenaikan temperatur rata-rata sekitar $0,267^\circ\text{C}$.

3. Radiasi Matahari VS Daya Maksimum

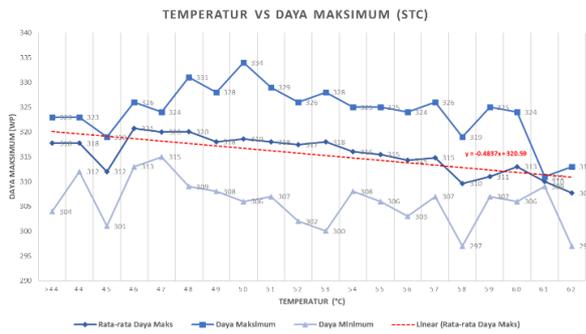


Gambar 10 Grafik hubungan antara radiasi matahari dengan daya maksimum

Grafik pada Gambar 10 menunjukkan penurunan daya maksimum dengan meningkatnya radiasi matahari. Pada iklim tropis, tidak selamanya semakin tinggi radiasi matahari akan meningkatkan daya maksimum panel surya karena pada penjelasan sebelumnya temperatur panel surya akan naik seiring naiknya radiasi matahari.

Grafik regresi linier menunjukkan tren penurunan daya maksimum secara linier dengan peningkatan radiasi matahari. Korelasi antara radiasi matahari dan daya maksimum menghasilkan persamaan regresi linier $y=-1,1587x+324,78$, yang menunjukkan bahwa daya maksimum panel surya berkurang sekitar $1,16 \text{ Wp}$ setiap kenaikan interval radiasi matahari.

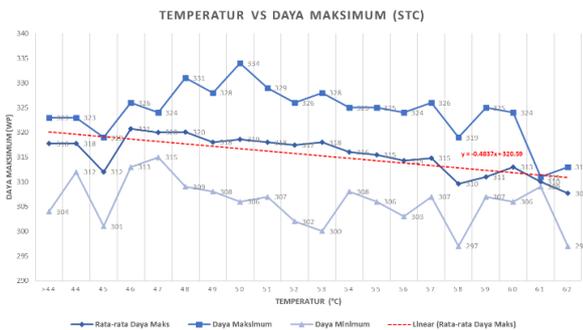
4. Temperatur VS Daya Maksimum



Gambar 11 Grafik hubungan antara temperatur dengan daya maksimum

Grafik

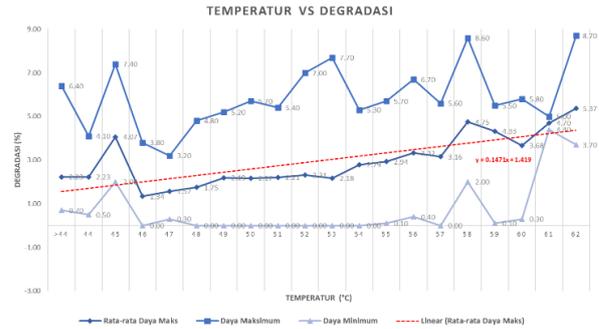
pada



Gambar 11 menunjukkan korelasi antara temperatur dan daya maksimum yang juga menyimpulkan korelasi antara Gambar 9 dan Gambar 10 bahwa pada akhirnya ketika terjadi kenaikan temperatur pada panel surya maupun radaiasi matahari tinggi atau rendah akan mengakibatkan penurunan daya maksimum sehingga akan mengakibatkan degradasi.

Grafik regresi linier memperlihatkan kecenderungan daya maksimum menurun secara linier dengan peningkatan temperatur pada panel surya. Korelasi antara temperatur dan daya maksimum menghasilkan persamaan regresi linier $y = -0,4837x + 320,59$, yang menunjukkan bahwa setiap peningkatan $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatur menyebabkan penurunan rata-rata daya maksimum sekitar **0,48 Wp**.

5. Temperatur VS Degradasi



Gambar 12 Grafik hubungan antara temperatur dengan degradasi

Grafik pada Gambar 12 menunjukkan korelasi antara temperatur dan persentase degradasi sebuah panel surya. Grafik ini memperkuat pernyataan sebelumnya bahwa dengan meningkatnya temperatur akan memperbesar persentase degradasi pada panel surya.

Grafik regresi linier memperlihatkan kecenderungan persentase degradasi meningkat secara linier dengan peningkatan temperatur pada panel surya. Korelasi antara temperatur dan persentase degradasi menghasilkan persamaan regresi linier $y = 0.1471x + 1.419$, yang menunjukkan bahwa setiap peningkatan $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatur menyebabkan penigkatan degradasi sebesar $\pm 0,15\%$.

6. Hasil Analisis Regresi

Formula regresi linier untuk keterkaitan degradasi dan performa panel surya multikristalin dengan kondisi lingkungan di iklim tropis sebagai berikut (Tabel III):

Tabel 3 Formula hubungan antar parameter

	RM	T	DM	D
RM	-	$y = 0,2673x + 51,622$	$y = -1,1587x + 324,78$	-
T	$y = 0,2673x + 51,622$	-	$y = -0,4837x + 320,59$	$y = 0.1471x + 1.419$
DM	$y = -1,1587x + 324,78$	$y = -0,4837x + 320,59$	-	-
D	-	$y = 0.1471x + 1.419$	-	-

*Ket: Radiasi Matahari (RM), Temperatur (T), Daya Maksimum (DM), Degradasi (D)

4. Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

Hasil translasi menunjukkan tingkat degradasi panel surya sebesar $\pm 1,16\%$ per tahun. Evaluasi performa menggunakan metode regresi linier mengungkap bahwa iklim tropis yang meningkatkan temperatur panel surya memperbesar persentase degradasi, di mana setiap kenaikan suhu sebesar $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ menyebabkan peningkatan degradasi sekitar $\pm 0,15\%$.

4.2 Saran

Sebaiknya untuk penelitian selanjutnya menggunakan lebih banyak sampel penelitian serta memperluas jangkauan penelitian untuk menghasilkan varia nilai yang beragam dari bebrapa lokasi Indonesia

5. Ucapan Terimakasih

Terimakasih kami ucapkan kepada PLTS Likupang yang telah memfasilitasi kami dalam pengumpulan data penelitan ini

Referensi

- [1] Green, M. A. (2019). "Solar cell efficiency tables (version 54)." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 27(7), 565–575
- [2] Chander, S., Purohit, A., Sharma, A., Arvind, A., Nehra, S. P., & Dhaka, M. S. (2015). "A study on photovoltaic parameters of mono-crystalline silicon solar cell with cell temperature." *Energy Reports*, 1, 104–109
- [3] Kumar, R., Singh, A. R., & Baredar, P. (2017). "A review on uncertainties in solar photovoltaic applications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 1092–1102
- [4] Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2021). "Solar cell efficiency tables (Version 57)." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 29(1), 3–15
- [5] Jordan, D. C., & Kurtz, S. R. (2013). "Photovoltaic degradation rates—an analytical review." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(1), 12–29
- [6] Meyer, E. L., & van Dyk, E. E. (2004). "Assessing the reliability and degradation of photovoltaic module performance parameters." *Renewable Energy*, 29(5), 703–712
- [7] Rohatgi, A., Sharma, A., & Upadhyay, P. (2020). "Long-term performance and degradation of crystalline silicon photovoltaic modules in tropical climate." *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 207, 110322
- [8] Sukardi, A., & Sari, I. P. (2022). Pengaruh Suhu Terhadap Efisiensi Panel Surya Berbasis Silikon di Wilayah Tropis. *Optika: Jurnal Teknik Elektro dan Informatika*, 15(2), 45-54. Diakses dari <https://ejournal.uniflor.ac.id/index.php/optika/article/download/3284/2063/13233>
- [9] PT Bumi Teknologi Internasional. (2023). Iklim Ekstrem dan Tantangan Panel Surya di Indonesia. *BTL Energy*. Diakses dari <https://www.btienergy.id/iklim-ekstrem-dan-tantangan-panel-surya-di-indonesia/>
- [10] Chander, S., Purohit, A., Sharma, A., Arvind, A., Nehra, S. P., & Dhaka, M. S. (2015). "A study on photovoltaic parameters of mono-crystalline silicon solar cell with cell temperature." *Energy Reports*, 1, 104–109
- [11] Kumar, N. M., & Ramesh, R. (2019). "Performance analysis of solar photovoltaic modules under tropical conditions." *Renewable Energy Focus*, 30, 5–11
- [12] Reis, V., Istrate, I. M., & Boudaden, J. (2017). "Degradation mechanisms of photovoltaic panels." *Renewable Energy Reviews*, 74, 177–189
- [13] Jordan, D. C., & Kurtz, S. R. (2013). "Photovoltaic degradation rates—an analytical review." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(1), 12–29
- [14] K. Kananda and R. Nazir., Konsep pengaturan aliran daya untuk PLTS tersambung ke sistem grid pada rumah tinggal, *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, vol. II, pp. 65-71
- [15] Salazar, April & Macabebe, Erees Queen., Hotspots detection in photovoltaic modules using infrared thermography. MATEC Web of Conferences
- [16] IEC 60891:2021. *Photovoltaic Devices - Procedures for Temperature and Irradiance Corrections to Measured I-V Characteristics*. International Electrotechnical Commission, 2021
- [17] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2020). *Solar Engineering of Thermal Processes*. 5th Edition. Wiley
- [18] Green, M. A. (1998). *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*. UNSW Pres
- [19] Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2021). *Introduction to Linear Regression Analysis*. 6th Edition. Wiley
- [20] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2020). *Solar Engineering of Thermal Processes*. 5th Edition. Wiley
- [21] Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., & Neter, J. (2004). *Applied Linear Regression Models*. 4th Edition. McGraw-Hill