



Efek Temperatur Terhadap Kinerja Modul Surya *Monocrystalline* dan *Polycrystalline Silicon*

Ambrosius A. Tino^{a,1}, Julius Tanesab^{a,2,*}, Rusman Sinaga^{a,3}, Aries Seubelan^{a,4}, Ledrik Singamou^{a,5}

^aProgram Studi Teknik Instalasi Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Kupang. Jl. Adisucipto, Penfui, Kupang, Nusa Tenggara Timur, Indonesia. P.O.Box. 139

¹ambrosiustino@yahoo.com; ²julius_halan@yahoo.co.id*; ³sinagarusman@gmail.com;

⁴arisseubelan821@gmail.com; ⁵ledriksingamou@gmail.com

* Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article History

Submission 02-03-2024

Revision 13-05-2024

Accepted 04-07-2024

Kata Kunci:

Temperatur sel, Efisiensi, Polycrystalline, Monocrystalline, Iklim tropis

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dampak temperatur terhadap kinerja modul surya. Pengujian dilakukan pada 4 buah modul surya yang terdiri dari 2 buah modul *monocrystalline silicon (mc-Si)* dan 2 buah modul *polycrystalline silicon (pc-Si)*, masing-masing berkapasitas 50 dan 100 Wp. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur mengakibatkan penurunan efisiensi semua modul surya yang diuji. Ditemukan bahwa koefisien temperatur terhadap efisiensi adalah 0.4%, 0.5%, 0.9% dan 1% masing-masing untuk modul *mc-Si* 50 Wp, *mc-Si* 100 Wp, *pc-Si* 100 Wp, dan *pc-Si* 50 Wp. Peningkatan temperatur lebih besar dialami oleh modul-modul berteknologi *pc-Si*. Nilai koefisien temperatur terhadap efisiensi *pc-Si* melampaui range tipikal koefisien modul-modul *crystalline* yaitu 0.2% hingga 0.5%. Hal ini diduga karena degradasi permanen akibat modul terpapar pada kondisi cuaca yang bervariasi.

This is an open access article under license [CC-BY-SA](#).



1. Pendahuluan

Kebutuhan energi listrik dunia terus meningkat seiring dengan kemajuan peradaban manusia. *International Energy Agency (IEA)* mencatat bahwa kebutuhan listrik dunia adalah sekitar 27.000 TWh pada tahun 2022. Angka tersebut diprediksi akan meningkat hingga hampir mencapai 30.000 TWh pada tahun 2025 [1]. Pemanfaatan sumber energi listrik seperti batu bara, bahan bakar minyak dan gas alam menghadapi kendala yang semakin besar. Hal ini disebabkan oleh sumber energi yang semakin berkurang dan munculnya persoalan polusi lingkungan yang membahayakan kehidupan manusia. Oleh karena itu pengembangan sumber tenaga alternatif yang terbarukan dan bebas polusi telah menjadi kebutuhan mendesak. Sumber-sumber energi terbarukan meliputi energi matahari, angin, ombak, air, dan panas bumi.

Diantara sumber-sumber terbarukan tersebut, matahari merupakan sumber energi yang persediaannya paling banyak. Energi matahari dirubah menjadi listrik menggunakan sistem

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Teknologi tersebut telah banyak diaplikasikan pada berbagai sektor seperti perumahan, komersial, dan industry. Madeti, dkk. [2] berargumen bahwa secara umum, PLTS dapat diklasifikasikan dalam tiga tipe yaitu sistem yang terhubung dengan jaringan utility (*grid connected photovoltaic (PV) system*), sistem yang tidak terhubung dengan jaringan utility atau berdiri sendiri (*stand alone PV system*), dan sistem yang memanfaatkan beberapa sumber energi (*hybrid PV system*). Penggunaan sistem-sistem tersebut disesuaikan dengan karakteristik beban dan sumber daya yang tersedia [3].

Komponen yang digunakan untuk merubah radiasi matahari menjadi energi listrik adalah modul surya (*photovoltaic module*). Dalam aplikasinya, kinerja modul surya dipengaruhi oleh beberapa faktor termasuk temperatur. Kenaikan temperatur menyebabkan penurunan kinerja modul surya. Salah satu parameter yang sering digunakan untuk mengkuantifikasi kinerja modul surya adalah efisiensi. Saat ini efisiensi modul surya yang beredar di pasaran adalah sekitar 15% hingga 20% [4]. Dalam sebuah studi, Rahmanian, dkk. [5] menemukan bahwa efisiensi modul surya menurun antara 0.5% hingga 0.65% untuk setiap kenaikan temperatur sebesar 1°C. Lebih lanjut, Sheik, dkk. [6] menemukan bahwa rating degradasi adalah dua kali lipat untuk setiap peningkatan temperatur operasi modul surya sebesar 10 °C. Temperatur modul surya yang terpasang di lapangan meningkat secara cepat dan mencapai nilai tertinggi akibat terekspos pada radiasi matahari. Penelitian menunjukkan bahwa hampir 80% radiasi matahari cenderung diubah menjadi panas daripada energi listrik [7]. Panas tersebut yang menyebabkan penurunan efisiensi modul surya.

Penurunan kinerja modul surya akibat kenaikan temperature bervariasi menurut teknologi. Kalogirou dan Tripanagnostopoulos [8] dalam sebuah penelitian menemukan bahwa setiap kenaikan temperatur 1 °C, efisiensi sel surya *monocrystalline* dan *polycrystalline silicon* menurun sekitar 0.45%, sedangkan untuk sel *amorphous silicon*, menurun sekitar 0,25%. Penelitian serupa dilakukan di Cyprus oleh Makrides, dkk. [9] untuk mengamati pengaruh temperatur pada kinerja berbagai teknologi modul surya. Hasilnya menunjukkan bahwa selama periode pengujian, rugi energi tertinggi dalam setahun adalah 8% untuk *monocrystalline*, 9% untuk *polycrystalline*, dan 5% untuk *amorphous silicon*. Hal ini berarti bahwa teknologi *amorphous* lebih sensitive terhadap peningkatan temperatur dibanding teknologi *crystalline*.

Dampak temperatur terhadap kinerja modul surya berbeda menurut tingkat degradasi akibat terekspos pada cuaca yang bervariasi dalam rentang waktu tertentu. Degradasi merujuk pada perubahan fisik modul secara permanen yang diakibatkan oleh perubahan intensitas cahaya matahari, kelembaban dan elemen-elemen lain di lingkungan pemasangan modul surya [10]. Perubahan fisik tersebut menyebabkan penurunan kinerja modul surya yang berdampak pada perubahan respon terhadap kenaikan temperatur. Deceglie, dkk. [11] dalam sebuah studi mengamati dampak peningkatan temperatur terhadap kinerja modul *copper indium gallium selenide (CIGS)* di laboratorium. Pengujian dilakukan dalam beberapa tahapan pencahayaan yang mempengaruhi degradasi sel. Ditemukan bahwa temperatur koefisien dari modul tersebut mengalami peningkatan *slope magnitude coefficient of temperature* sebesar 15% dari hasil pengujian awal.

Dari uraian di atas jelas bahwa efek temperatur pada kinerja modul berbeda menurut teknologi, degradasi dan kondisi lingkungan (*ambient conditions*) tempat pemasangan. Hasil

penelitian efek temperatur pada kinerja modul di lokasi tertentu tidak dapat digeneralisir untuk modul di daerah lain. Penelitian ini dilakukan untuk mengamati dampak peningkatan temperatur pada modul *monocrystalline* dan *polycrystalline silicon* yang telah berumur lebih dari dua tahun di sebuah daerah beriklim tropis, Kupang, Nusa Tenggara Timur, Indonesia. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi untuk operasi dan desain PLTS di daerah beriklim tropis khususnya di Kupang, Nusa Tenggara Timur.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efek temperatur terhadap kinerja modul surya *monocrystalline silicon (mc-Si)* dan *polycrystalline silicon (pc-Si)*. Untuk mencapai tujuan tersebut maka dilakukan pengujian pada 4 buah modul surya yang terdiri dari 2 buah modul mc-Si dan 2 buah modul pc-Si masing-masing berkapasitas 50 dan 100 Wp. Spesifikasi keempat modul tersebut seperti diperlihatkan pada Tabel 1.

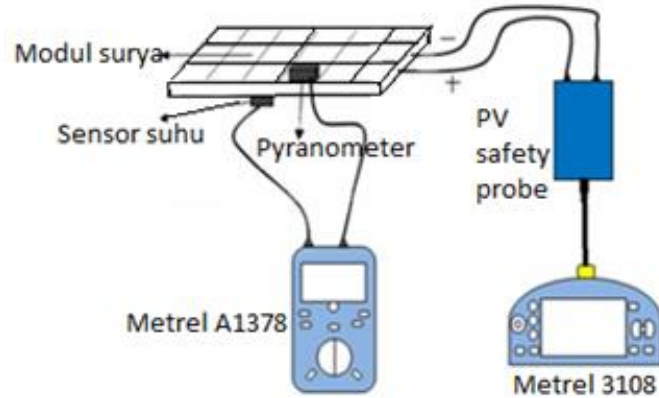
Tabel 1: Data spesifikasi modul surya yang diuji

Parameters	mc-Si	pc-Si	mc-Si	pc-Si
<i>Maximum Power (Pmax)</i>	50 Wp	50 Wp	100 Wp	100 Wp
<i>Current at Pmax (Imp)</i>	2.95 A	2.86 A	5.62 A	5.72 A
<i>Voltage at Pmax (Vmp)</i>	17.0 V	17.6 V	17.8 V	17.5 V
<i>Open Cirrcuit Voltage (Voc)</i>	21.5 V	22.0 V	21.8 V	21.6 V
<i>Short Circuit Current (Isc)</i>	3.28 A	3.03 A	6.05 A	6.46 A
<i>Maximum System Voltage</i>	700 VDC	700 VDC	1000 VDC	1000 VDC
<i>Surface area</i>	0.35 m ²	0.35 m ²	0.72 m ²	0.69 m ²

Tahapan penelitian adalah:

1. Pasang modul surya pada penopang lalu tempatkan di tempat terbuka tanpa bayangan (*shading*).
2. Atur dudukan modul pada posisi optimal untuk wilayah Kupang, Nusa Tenggara Timur yaitu menghadap ke Utara dengan sudut kemiringan 10° [12].
3. Permukaan modul surya yang akan diuji dibersihkan sebelum digunakan.
4. Lakukan pengukuran temperatur (*T*) pada permukaan bagian belakang (*backsheet*) modul dan intensitas cahaya matahari (*G*) menggunakan Metrel A1378. Paralel dengan pengukuran tersebut, dilakukan juga pengukuran kinerja modul surya dengan cara merekam kurva arus dan tegangan (*I-V curve*) menggunakan *photovoltaic (PV) analyzer* Metrel MI 3108. Rangkaian pengukuran selengkapny seperti diperlihatkan pada Gambar 1. Berdasarkan kurva tersebut maka parameter-parameter yang merepresentasikan kinerja modul surya diekstrak. Parameter-parameter tersebut meliputi daya keluaran maksimum (*maximum power output, Pmax*), arus maksimum (*current at maximum power, Imp*), tegangan pada daya maksimum (*voltage at maximum power, Vmp*), tegangan rangkaian terbuka (*open circuit voltage, Voc*), dan arus hubung singkat (*short circuit current, Isc*). Untuk mengamati efek temperatur maka pengukuran kinerja modul surya dilakukan pada saat intensitas cahaya matahari cenderung konstant pada nilai 1000 W/m² yang merujuk pada keadaan pengujian standard (*Standard Test Condition/STC*) [13]. Pengendalian temperatur dilakukan dengan menutup permukaan modul surya menggunakan karton sesaat sebelum

pengukuran. Pengujian kinerja dimulai dari suhu terendah hingga suhu tertinggi yang dicapai modul.



Gambar 1. Rangkaian pengukuran T , G , dan I - V curve modul surya

Dalam penelitian ini, efisiensi modul surya dijadikan sebagai parameter untuk membandingkan efek temperature pada kinerja keempat modul yang bervariasi menurut kapasitas dan teknologi. Efisiensi (η) dihitung dengan rumus:

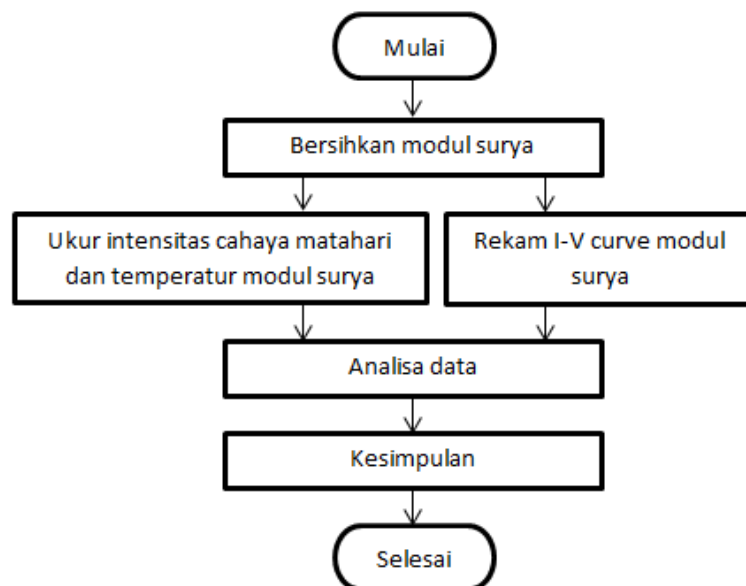
$$\eta = \frac{P_{max}}{G \times A} \times 100\% \quad (1)$$

dimana: P_{max} : daya keluaran maksimum (Wp)

G : intensitas cahaya matahari (W/m^2)

A : luas permukaan modul surya (m^2)

Tahapan penelitian di atas dirangkum dan disajikan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Tahapan penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

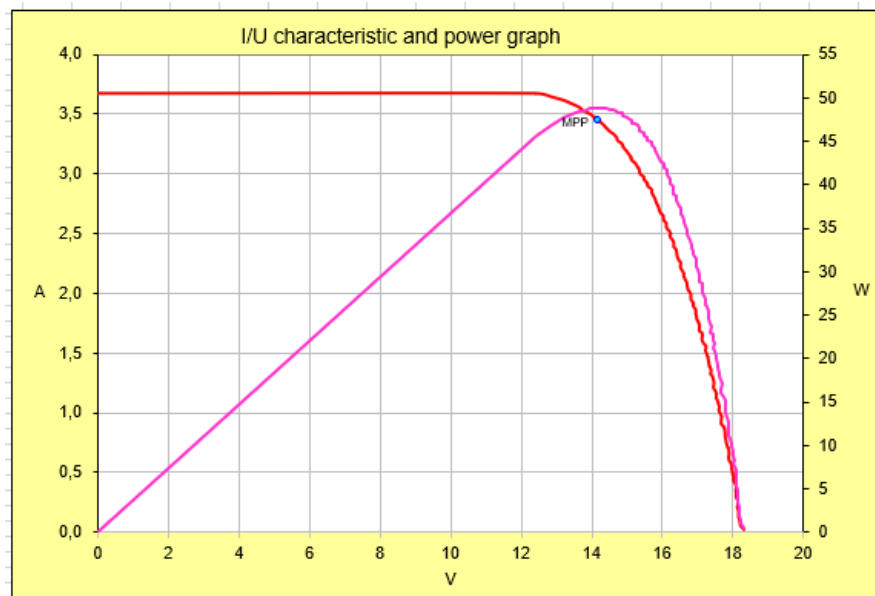
3.1. Efek temperatur terhadap kinerja modul surya mc-Si

Proses pengukuran intensitas cahaya matahari (G), temperatur (T) dan I - V curve modul surya sesuai prosedur sebagaimana dijelaskan di bagian metode diperlihatkan pada Gambar 3.

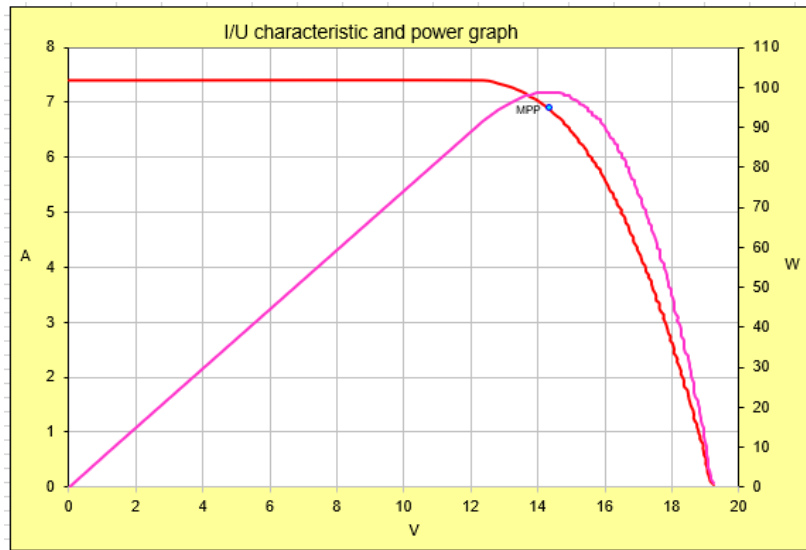


Gambar 3. Proses pengukuran T , G dan I - V curve modul surya

Contoh hasil rekam I - V curve modul surya mc - Si 50 Wp dan 100 Wp pada temperatur terendah seperti ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. I - V curve mc - Si 50 Wp pada $T = 37$ °C dan $G = 1020$ W/m²



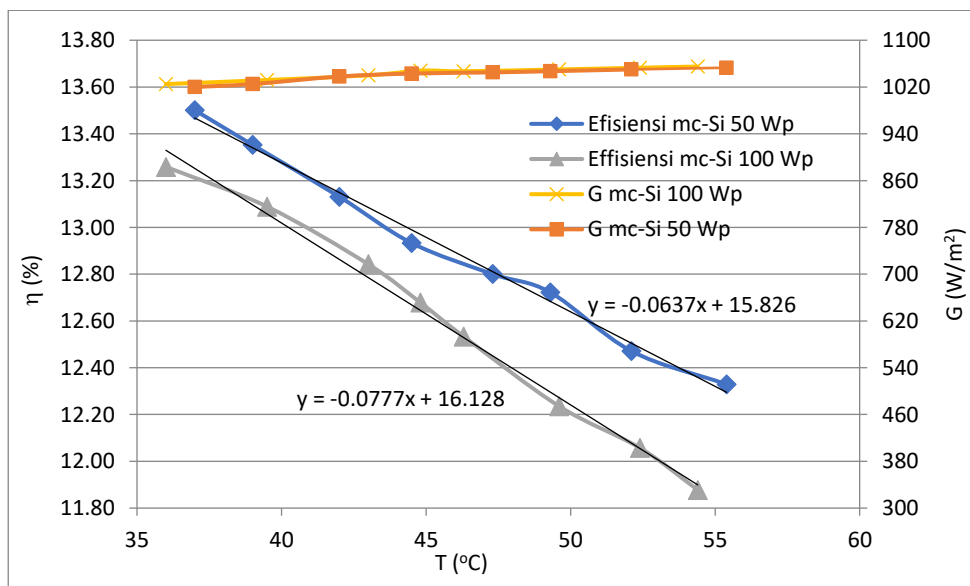
Gambar 5. I-V curve mc-Si 100 Wp pada $T = 36^{\circ}\text{C}$ dan $G = 1025 \text{ W/m}^2$

Dari Gambar 4 dan Gambar 5, nilai parameter listrik dapat diketahui dan selanjutnya digunakan untuk menghitung efisiensi masing-masing modul tersebut dengan rumus pada persamaan (1). Hasil perhitungan efisiensi kedua modul seperti ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2: Hasil perhitungan efisiensi modul mc-Si

Modul	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	V_{mp} (V)	I_{mp} (A)	P_{max} (W)	G (W/m^2)	T ($^{\circ}\text{C}$)	A (m^2)	η (%)
mc-Si 50 Wp	18.31	3.67	14.2	3.44	48.9	1020	37	0.35	13.5
mc-Si 100 Wp	19.27	7.41	14.4	6.88	98.8	1025	36	0.72	13.3

Dengan cara yang sama, efisiensi kedua modul surya pada temperatur yang lebih tinggi diperoleh. Hasil selengkapnya mulai dari temperatur terendah hingga tertinggi diplot dalam bentuk grafik seperti diperlihatkan pada Gambar 6.



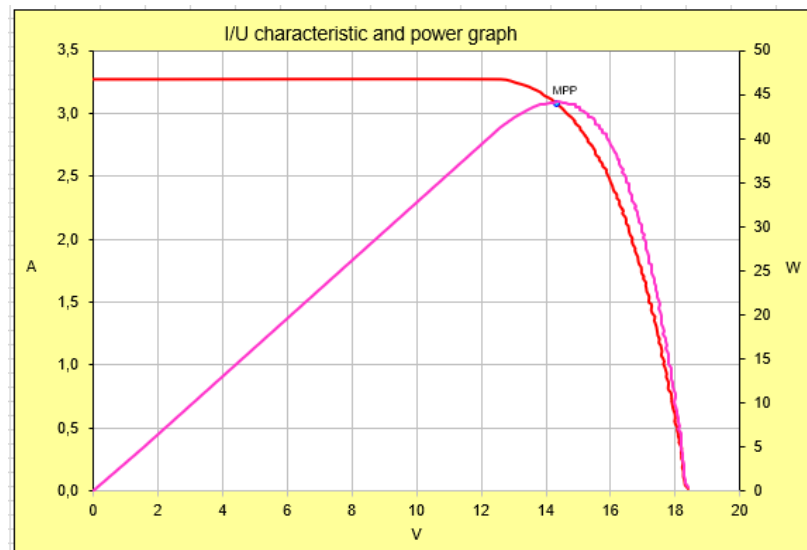
Gambar 6. Efisiensi mc-Si 50 dan 100 Wp

Sebagaimana dijelaskan di tahapan penelitian bahwa pengamatan ini ditujukan untuk mengetahui dampak temperatur terhadap kinerja modul surya pada intensitas cahaya matahari standard yaitu 1000 W/m^2 [13]. Gambar 6 menunjukkan bahwa saat pengujian, temperatur terendah yang dicapai oleh modul *mc-Si* 50 dan 100 Wp adalah 37 dan 36 °C, sementara yang tertinggi adalah 55.4 dan 54.4 °C. Nilai-nilai tersebut dicatat pada intensitas cahaya matahari yang cenderung lebih besar dari standard yaitu mulai dari 1020 hingga 1055 W/m^2 . Nilai standard sulit dicapai pada pengujian ini karena perubahan intensitas cahaya matahari yang sangat cepat.

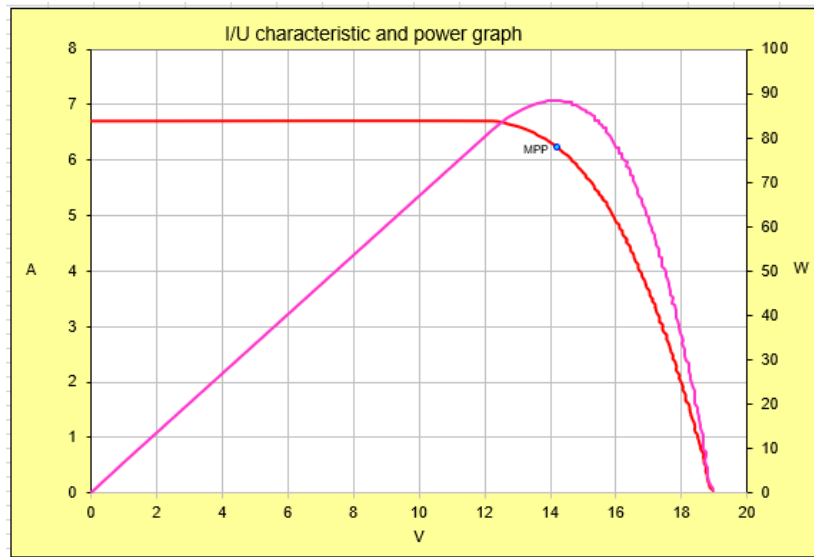
Walaupun memiliki teknologi yang sama, efisiensi kedua modul berbeda. Dapat diamati bahwa efisiensi *mc-Si* 50 Wp lebih baik dibandingkan *mc-Si* 100 Wp. Dengan menerapkan persamaan analisis regresi pada Gambar 6 maka efisiensi kedua modul pada temperatur tertentu dapat dihitung. Sebagai contoh pada temperatur standard 25 °C [13], efisiensi modul *mc-Si* 50 dan 100 Wp masing-masing sebesar 14.23 dan 14.18%. Temuan ini mengkonfirmasi hasil-hasil penelitian sebelumnya yang mengklaim bahwa walaupun berteknologi sama, efisiensi modul dapat berbeda-beda [14]. Hal ini karena efisiensi tidak hanya tergantung pada temperatur tetapi juga pada spektrum dan intensitas cahaya [15], serta degradasi permanen modul surya [11]. Selain itu, Gambar 6 juga memberikan informasi bahwa efisiensi modul menurun seiring dengan meningkatnya temperatur. Kenaikan temperatur menyebabkan penurunan tegangan modul sehingga daya keluaran dan efisiensi juga menurun [16], [17].

3.2. Efek temperatur terhadap kinerja modul surya *pc-Si*

Sama halnya dengan modul-modul *mc-Si* yang dibahas di subbagian 3.1, pengukuran kinerja juga dilakukan pada modul *pc-Si* 50 dan 100 Wp. Contoh hasil rekam *I-V curve* modul surya *pc-Si* 50 dan 100 Wp pada temperatur (*T*) terendah seperti ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 7. *I-V curve pc-Si* 50 Wp pada $T = 38.2 \text{ }^\circ\text{C}$ dan $G = 1017 \text{ W/m}^2$



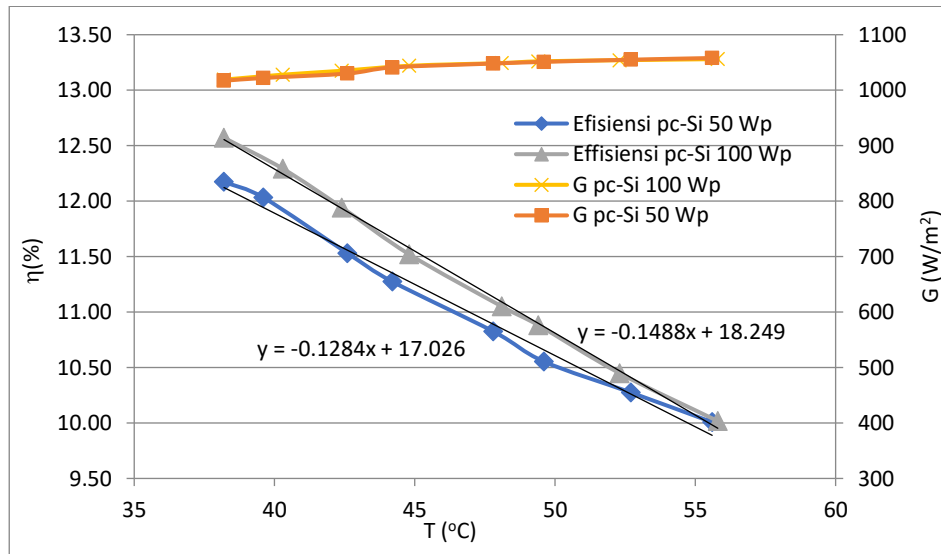
Gambar 8. *I-V curve pc-Si 100 Wp pada $T = 38.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $G = 1019\text{ W/m}^2$*

Berdasarkan Gambar 7 dan Gambar 8, maka nilai parameter listrik diekstrak dan digunakan untuk menghitung efisiensi masing-masing modul tersebut dengan menerapkan persamaan (1). Hasil perhitungan efisiensi modul *pc-Si 50* dan *100 Wp* seperti ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3: Hasil perhitungan efisiensi modul *pc-Si*

Modul	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	V_{mp} (V)	I_{mp} (A)	P_{max} (W)	G (W/m ²)	T ($^{\circ}\text{C}$)	A (m ²)	η (%)
<i>pc-Si 50 Wp</i>	18.40	3.27	14.4	3.07	44.2	1017	38.2	0.35	12.17
<i>pc-Si 100 Wp</i>	18.95	6.70	14.2	6.22	88.4	1019	38.4	0.69	12.57

Hasil lengkap perhitungan efisiensi kedua modul mulai dari temperatur terendah hingga tertinggi diperlihatkan pada Gambar 9.



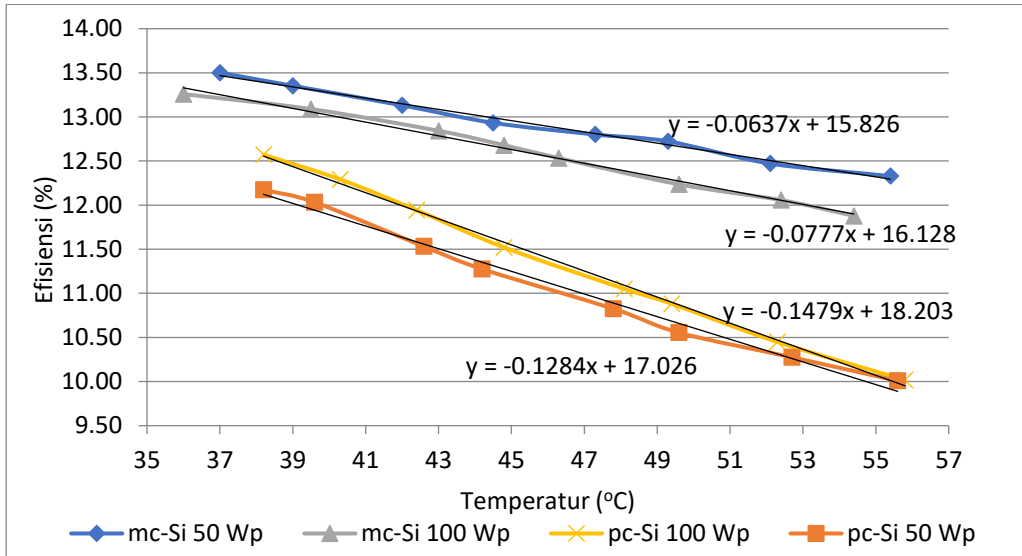
Gambar 9. Efisiensi *pc-Si* 50 dan 100 Wp

Gambar 9 menunjukkan bahwa saat pengujian, temperatur terendah yang dicapai oleh modul *pc-Si* 50 dan 100 Wp adalah 38.2 dan 38.4 °C, sementara yang tertinggi adalah 55.6 dan 55.8 °C. Nila-nilai tersebut direkam pada intensitas cahaya matahari yang cenderung lebih tinggi dari standard yaitu mulai dari 1017 hingga 1056 W/m². Sama halnya dengan modul-modul *mc-Si* di subbagian 3.1, nilai standard sulit dicapai pada pengujian modul *pc-Si* juga karena perubahan intensitas cahaya matahari yang sangat cepat.

Gambar 9 menginformasikan bahwa walaupun berteknologi sama, efisiensi modul *pc-Si* 50 dan 100 Wp berbeda. Efisiensi *pc-Si* 100 Wp lebih tinggi dibandingkan *pc-Si* 50 Wp. Dengan menerapkan persamaan analisis regresi pada Gambar 9 maka efisiensi modul *pc-Si* 100 dan 50 Wp pada temperatur standard (25 °C) masing-masing sebesar 14,52 dan 13.81%. Selain itu, Gambar 9 juga menampilkan informasi bahwa efisiensi modul menurun seiring dengan meningkatnya temperatur. Tren penurunan efisiensi kedua modul *pc-Si* tersebut berbeda dengan modul-modul *mc-Si* pada pembahasan di subbagian 3.1. Pada nilai temperatur yang lebih tinggi (sekitar 50 hingga 55 °C), perbedaan efisiensi antara kedua modul *pc-Si* tersebut semakin kecil. Diduga bahwa pada range temperatur tersebut, radiasi yang diterima oleh sel-sel dari kedua modul cenderung dirubah menjadi panas daripada energi listrik.

3.3. Perbandingan efek temperatur terhadap kinerja *mc-Si* dan *pc-Si*

Untuk memudahkan penilaian efek temperatur terhadap kinerja modul surya yang berbeda teknologi (*mc-Si* dan *pc-Si*) maka efisiensi keempat modul tersebut diplot dalam sebuah grafik seperti diperlihatkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Efisiensi modul surya *mc-Si* dan *pc-Si*

Gambar 10 menunjukkan bahwa keempat modul surya memiliki efisiensi yang bervariasi. Dengan asumsi bahwa variasi intensitas kecil (dari 1020 hingga 1050 W/m²) sehingga dampaknya dapat diabaikan maka efisiensi modul-modul tersebut pada temperatur standard, 25 °C [13], dapat dijadikan acuan perbandingan kinerja. Dengan menerapkan rumus-rumus persamaan analisis regresi pada Gambar 10, hasil perhitungan menunjukkan bahwa pada temperatur standard, efisiensi tertinggi adalah 14.52% (*pc-Si* 100 Wp) diikuti 14.23 (*mc-Si* 50 Wp), 14.18 (*mc-Si* 100 Wp), dan 13.81 (*pc-Si* 50 Wp).

Gambar 10 juga menunjukkan bahwa peningkatan temperatur mengakibatkan penurunan efisiensi semua modul surya yang diuji. Dengan asumsi yang sama dimana variasi intensitas dapat diabaikan maka koefisien temperatur terhadap efisiensi (*temperature coefficient of efficiency*) dapat juga dihitung menggunakan persamaan regresi di Gambar 10. Dari hasil perhitungan ditemukan bahwa koefisien temperature adalah 0.4% (*mc-Si* 50 Wp), 0.5% (*mc-Si* 100 Wp), 0.9% (*pc-Si* 100 Wp), dan 1% (*pc-Si* 50 Wp). Dari nilai-nilai tersebut dapat diketahui bahwa dampak peningkatan temperatur lebih besar dialami oleh modul-modul *pc-Si* walaupun dalam perhitungan efisiensi pada temperatur standar di paragraf sebelumnya efisiensi modul *pc-Si* 100 Wp paling tinggi. Dengan kata lain modul *pc-Si* lebih sensitif terhadap peningkatan temperatur. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian [9] yang menemukan bahwa pada aplikasi di lapangan kinerja modul *mc-Si* lebih baik dibanding *pc-Si*.

Walaupun koefisien temperature *mc-Si* dapat dikatakan kecil, tetapi sudah mendekati ambang maksimum tipikal koefisien temperatur modul surya berteknologi *crystalline* yang berkisar antara 0.2 hingga 0.5% [18]. Sementara itu, koefisien temperatur *pc-Si* jauh lebih besar dari range tersebut di atas. Penurunan yang signifikan pada kedua teknologi ini dapat diakibatkan oleh degradasi permanen [11][19] yang dialami modul yang disebabkan oleh keadaan iklim tempat pemasangan modul. Hal ini didukung oleh laporan [20] bahwa modul-modul yang beroperasi di daerah dengan kelembaban tinggi dan berada dekat pesisir pantai seperti Kupang berpeluang memiliki degradasi yang lebih besar.

4. Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dampak temperatur terhadap kinerja modul surya. Pengujian dilakukan pada 4 buah modul surya yang terdiri dari 2 buah modul *mc-Si* dan 2 buah modul *pc-Si*, masing-masing berkapasitas 50 dan 100 Wp. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur mengakibatkan penurunan efisiensi semua modul surya yang diuji. Dari hasil perhitungan ditemukan bahwa koefisien temperatur terhadap efisiensi (*temperature coefficient of efficiency*) adalah 0.4%, 0.5%, 0.9% dan 1% masing-masing untuk modul *mc-Si* 50 Wp, *mc-Si* 100 Wp, *pc-Si* 100 Wp dan *pc-Si* 50 Wp. Nilai-nilai koefisien tersebut menunjukkan bahwa dampak peningkatan temperatur lebih besar dialami oleh modul-modul *pc-Si*. Koefisien temperatur terhadap efisiensi dari *pc-Si* jauh lebih besar dari range tipikal koefisien modul kristalin yaitu 0.2 hingga 0.5%. Hal ini diduga karena degradasi modul akibat terpapar pada kondisi lingkungan dengan kelembaban tinggi dan berada di dekat pesisir pantai.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Energy Agency (IEA), "Electricity Market Report 2023," 2023. Accessed: Mar. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-2023>
- [2] S. R. Madeti and S. N. Singh, "Monitoring system for photovoltaic plants: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 1180–1207, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2016.09.088.
- [3] T. Hwang, S. Kang, and J. T. Kim, "Optimization of the building integrated photovoltaic system in office buildings—Focus on the orientation, inclined angle and installed area," *Energy Build*, vol. 46, pp. 92–104, Mar. 2012, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2011.10.041.
- [4] V. Benda and L. Černá, "PV cells and modules – State of the art, limits and trends," *Heliyon*, vol. 6, no. 12, p. e05666, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.HELIYON.2020.E05666.
- [5] S. Rahmanian, H. Rahmanian-Koushkaki, P. Omidvar, and A. Shahsavari, "Nanofluid-PCM heat sink for building integrated concentrated photovoltaic with thermal energy storage and recovery capability," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 46, p. 101223, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.SETA.2021.101223.
- [6] M. S. Sheik, P. Kakati, D. Dandotiya, U. R. M, and R. C. S, "A comprehensive review on various cooling techniques to decrease an operating temperature of solar photovoltaic panels," *Energy Nexus*, vol. 8, p. 100161, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.NEXUS.2022.100161.
- [7] M. M. Rahman, M. Hasanuzzaman, and N. A. Rahim, "Effects of various parameters on PV-module power and efficiency," *Energy Convers Manag*, vol. 103, pp. 348–358, Oct. 2015, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2015.06.067.
- [8] S. A. Kalogirou, R. Agathokleous, and G. Panayiotou, "On-site PV characterization and the effect of soiling on their performance," *Energy*, vol. 51, pp. 439–446, Mar. 2013, doi: 10.1016/J.ENERGY.2012.12.018.
- [9] G. Makrides, B. Zinsser, A. Phinikarides, M. Schubert, and G. E. Georghiou, "Temperature and thermal annealing effects on different photovoltaic technologies," *Renew Energy*, vol. 43, pp. 407–417, Jul. 2012, doi: 10.1016/J.RENENE.2011.11.046.

- [10] J. Tanesab, D. Parlevliet, J. Whale, T. Urmee, and T. Pryor, "The contribution of dust to performance degradation of PV modules in a temperate climate zone," *Solar Energy*, vol. 120, 2015, doi: 10.1016/j.solener.2015.06.052.
- [11] M. G. Deceglie, T. J. Silverman, B. Marion, and S. R. Kurtz, "Metastable changes to the temperature coefficients of thin-film photovoltaic modules," in *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2014, pp. 337–340. doi: 10.1109/PVSC.2014.6924926.
- [12] J. Tanesab, M. D. Letik, A. A. Tino, and Y. S. Peli, "Experimental study of dust impact on power output degradation of various photovoltaic technologies deployed in West Timor, Indonesia," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018. doi: 10.1088/1755-1315/188/1/012038.
- [13] International Electrotechnical Commission (IEC), "IEC 60891: Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics," Geneva, Switzerland, 2021.
- [14] P. K. Dash and N. C. Gupta, "Effect of temperature on power output from different commercially available photovoltaic modules," *Int J Eng Res Appl*, vol. 5, no. 1, pp. 148–151, 2015.
- [15] E. Klampaftis, D. Ross, K. R. McIntosh, and B. S. Richards, "Enhancing the performance of solar cells via luminescent down-shifting of the incident spectrum: A review," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 93, no. 8, pp. 1182–1194, Aug. 2009, doi: 10.1016/J.SOLMAT.2009.02.020.
- [16] J. K. Kaldellis, M. Kapsali, and K. A. Kavadias, "Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece," *Renew Energy*, vol. 66, pp. 612–624, Jun. 2014, doi: 10.1016/J.RENENE.2013.12.041.
- [17] B. R. Paudyal and A. G. Imenes, "Investigation of temperature coefficients of PV modules through field measured data," *Solar Energy*, vol. 224, pp. 425–439, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.SOLENER.2021.06.013.
- [18] D. T. Cotfas, A. Cotfas, and O. M. Machidon, "Study of Temperature Coefficients for Parameters of Photovoltaic Cells," 2018, doi: 10.1155/2018/5945602.
- [19] M. Piliougine, A. Oukaja, M. Sidrach-de-Cardona, and G. Spagnuolo, "Temperature coefficients of degraded crystalline silicon photovoltaic modules at outdoor conditions," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 29, no. 5, pp. 558–570, 2021.
- [20] J. Tanesab, D. Parlevliet, J. Whale, and T. Urmee, "Seasonal effect of dust on the degradation of PV modules performance deployed in different climate areas," *Renew Energy*, vol. 111, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.03.091.