Technology, Health, and Agriculture Nexus: Conference Series
https://journal.ummat.ac.id/index.php/tcs
Vol. 2 No. 3, November 2026, Hal. 88-95

Seasonal Variability of Surface Solar Radiation under Different Cloud Conditions in Indonesia

Rafli Iqbal Taufiqi[1], Didik Kurniawan[2], Veimas Mahardhika Pramuji[3], Purwanti Lelly Sabrina[4]
[1234]Departement of Meteorology, State College of Meteorology Climatology and Geophysics
[1]rafliqbal060204@gmail.com, [2]kurniawandidik607@gmail.com, [3]meteo.vei@gmail.com, [4]purwantilelly.work@stmkg.ac.id

Keywords:
Cloud Cover,
Indonesia,
Surface Solar Radiation.

ABSTRACT

Abstract: *This study examines the seasonal variability of surface solar radiation (SSRD) across Indonesia under different cloud conditions using ERA5 monthly reanalysis data for the period 2016–2025. Monthly grid cells were classified into clear, moderate, and overcast categories based on tercile thresholds of total cloud cover (TCC), and the spatial correlation between SSRD and TCC was assessed for each season. Results show that SSRD is strongly modulated by seasonal cloud patterns: western and equatorial Indonesia receive markedly less radiation than the southeastern islands, particularly during JJA and SON. Clear-sky conditions yield 50–90 W/m² higher SSRD than overcast conditions in every season, and the interannual SSRD–TCC correlation is predominantly negative across almost the entire domain. These findings provide a spatially and seasonally resolved basis for solar photovoltaic (PV) resource planning in Indonesia.*

Kata Kunci:

Indonesia,
Radiasi Matahari Permukaan,
Tutupan Awan.

Abstrak: Penelitian ini mengkaji variabilitas musiman radiasi matahari permukaan (SSRD) di Indonesia pada kondisi awan berbeda menggunakan data reanalisis bulanan ERA5 periode 2016–2025. Grid-bulan diklasifikasikan ke dalam kategori cerah, sedang, dan berawan berdasarkan tersil tutupan awan total (TCC), dan korelasi spasial SSRD–TCC dihitung per musim. Hasil menunjukkan SSRD sangat dipengaruhi pola awan musiman: wilayah barat/ekuator menerima radiasi jauh lebih rendah dibanding wilayah tenggara, terutama pada JJA dan SON. Kondisi cerah menghasilkan SSRD 50–90 W/m² lebih tinggi dibanding kondisi berawan pada setiap musim, dan korelasi SSRD–TCC antar-tahun didominasi hubungan negatif di hampir seluruh domain. Temuan ini memberikan dasar perencanaan sumber daya PV surya di Indonesia yang lebih tepat secara spasial dan musiman.

Article History:

Received : 01-10-2026
Accepted : 30-11-2026

This is an open access article under the CC–BY-SA license

A. LATAR BELAKANG

Indonesia terletak di sepanjang garis khatulistiwa antara 6°LU dan 11°LS, menerima salah satu tingkat radiasi matahari paling melimpah dan konsisten di dunia sepanjang tahun, menjadikannya sumber daya yang strategis bagi transisi energi terbarukan nasional. Pemerintah Indonesia telah menetapkan target ambisius, termasuk pangsa energi terbarukan sebesar 23% pada 2025 dan rencana jangka panjang penambahan kapasitas PV surya hingga 113 GW pada 2050 sebagai bagian dari Strategi Jangka Panjang Rendah Karbon dan Ketahanan Iklim (LTS-LCCR) 2050 (Tarigan, 2025). Sistem kelistrikan nasional juga tengah diarahkan untuk mengakomodasi penetrasi energi terbarukan yang lebih besar (International Energy Agency, 2023).

Skala potensi teknis energi surya di Indonesia sesungguhnya sangat besar. Kajian geospasial berbasis kerangka *project finance* memperkirakan potensi teknis PV skala utilitas di Indonesia mencapai rata-rata 12.200 TWh/tahun, jauh melampaui kebutuhan listrik nasional yang diproyeksikan hingga 2030, meskipun potensi yang benar-benar layak secara finansial (*bankable*) jauh lebih kecil karena dibatasi oleh risiko investasi dan ketersediaan lahan (Langer et al., 2023). Kesenjangan besar antara potensi teknis dan realisasi ini menunjukkan

bahwa faktor fisis seperti variabilitas sumber daya surya perlu dipetakan secara lebih rinci agar perencanaan lokasi PV dapat lebih tepat sasaran.

Meskipun berada di kawasan tropis dengan potensi radiasi matahari tinggi, pemanfaatan energi surya di Indonesia masih jauh di bawah potensi teknisnya. Beberapa kajian menunjukkan bahwa hambatan utama meliputi regulasi yang kurang menguntungkan bagi investor, minimnya dukungan kelembagaan finansial maupun non-finansial, rendahnya literasi energi di kalangan pengguna akhir, serta tingginya biaya investasi awal (Safaat & Samputra, 2026). Selain hambatan kebijakan dan ekonomi tersebut, terdapat pula kendala fisis-klimatologis: tutupan awan yang persisten dan bervariasi secara spasial, yang sangat terkait dengan sistem monsun Asia Australia dan posisi Indonesia sebagai bagian dari Benua Maritim Indonesia (Indonesian Maritime Continent). Studi terbaru mengenai curah hujan Indonesia menegaskan bahwa pola musiman dan spasial curah hujan dan secara implisit tutupan awan yang menyertainya sangat bervariasi antarwilayah dan antarmusim, dipengaruhi oleh moda iklim regional seperti Indian Ocean Dipole (IOD) dan El Niño–Southern Oscillation (ENSO) (Ariska et al., 2024; Nurdiati et al., 2022; Sudarman et al., 2024).

Awan memodulasi jumlah radiasi gelombang pendek yang sampai ke permukaan bumi terutama melalui refleksi (efek pendinginan gelombang pendek). Dalam konteks tropis-maritim seperti Indonesia, efek ini diperkirakan sangat bervariasi menurut musim, didorong oleh pergeseran Intertropical Convergence Zone (ITCZ) dan pembalikan arah angin monsun antara musim basah Desember–Februari (DJF) dan musim relatif kering Juni–Agustus (JJA). Fenomena peralihan musim itu sendiri terbukti berpengaruh nyata terhadap distribusi radiasi matahari di wilayah tertentu; kajian di Nusa Tenggara Timur (NTT) menunjukkan bahwa bulan-bulan peralihan monsun—yang dapat diidentifikasi melalui perubahan tanda indeks monsun Australia (AUSMI) berkaitan erat dengan variasi intensitas radiasi matahari harian di wilayah tersebut, dengan intensitas tertinggi tercatat pada wilayah perairan dan sebagian daratan selatan yang dapat melampaui 350 W/m² pada periode peralihan monsun tertentu (Taufiqi et al., 2025). Temuan ini menegaskan bahwa memahami hubungan awan–radiasi musiman pada skala spasial nasional sangat penting untuk keperluan asesmen sumber daya surya, pemilihan lokasi PV, dan perencanaan jaringan listrik.

Untuk mengarakterisasi variabilitas ini dalam periode dekadal, penelitian ini menggunakan reanalisis ERA5 yang diproduksi oleh European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), yang menyediakan estimasi radiasi matahari permukaan, radiasi matahari langit-cerah (*clear-sky*), dan tutupan awan total secara global dan konsisten (Hersbach et al., 2020). Beberapa studi validasi menunjukkan bahwa estimasi radiasi horizontal global (GHI) dari ERA5 memiliki akurasi yang bervariasi menurut wilayah dan musim dibandingkan data pengamatan permukaan maupun satelit (Urraca et al., 2018), sementara evaluasi khusus di Indonesia menunjukkan bahwa ERA5 dan MERRA-2 memiliki bias musiman yang berbeda-beda terhadap pengamatan stasiun BMKG (Sianturi et al., 2020). Konsisten dengan temuan tersebut, evaluasi terbaru di Provinsi NTT yang membandingkan ERA5 dengan produk reanalisis NCEP/DOE Reanalysis II terhadap data Automatic Weather Station (AWS) menunjukkan bahwa ERA5 memiliki performa lebih baik dengan RMSE sebesar 56,456 W/m² dan koefisien korelasi 0,48 (kategori sedang), meskipun nilai bias (MBE)-nya sedikit lebih tinggi dibandingkan NCEP/DOE menegaskan bahwa ERA5 secara umum lebih andal untuk mengestimasi radiasi matahari di wilayah Indonesia yang minim pengukuran langsung, tetapi tetap memiliki keterbatasan akurasi yang perlu diperhitungkan (Taufiqi et al., 2025).

Selain itu, representasi tutupan awan dalam produk reanalisis termasuk ERA5 juga diketahui berbeda secara sistematis dari observasi berbasis satelit MODIS (Wu et al., 2023), dan evaluasi ERA5 untuk aplikasi energi surya dan angin di wilayah lain juga menunjukkan perlunya koreksi bias regional (Wilczak et al., 2024). Ketidaktepatan parameterisasi tutupan awan bahkan disebut sebagai salah satu sumber bias utama pada berbagai produk reanalisis radiasi matahari secara global (Taufiqi et al., 2025), yang memperkuat pentingnya menganalisis hubungan langsung antara kondisi awan dan radiasi permukaan secara eksplisit bukan hanya mengevaluasi akurasi reanalisis semata dalam konteks Indonesia.

Sejumlah kajian telah membahas potensi teknis dan kelayakan finansial PV skala utilitas di Indonesia (Langer et al., 2023; Paradongan et al., 2024), maupun strategi pengembangan PV terhubung jaringan (Ariyadi & Purwanto, 2024), namun umumnya menggunakan rata-rata radiasi tahunan atau bulanan tanpa secara eksplisit mengkuantifikasi seberapa besar variabilitas spasial sumber daya surya tersebut disebabkan oleh perbedaan kondisi awan antarmusim. Di sisi lain, evaluasi reanalisis radiasi matahari yang telah dilakukan di Indonesia termasuk yang berfokus pada periode peralihan monsun di NTT umumnya bersifat titik-tunggal (dibandingkan hanya dengan satu atau beberapa stasiun AWS) dan terbatas pada satu provinsi atau wilayah

kecil, sehingga belum menggambarkan pola spasial radiasi matahari dan tutupan awan untuk seluruh wilayah Indonesia secara musiman dalam periode dekadal (Sianturi et al., 2020; Taufiqi et al., 2025). Kajian iklim curah hujan Indonesia (Ariska et al., 2024; Nurdiati et al., 2022; Sudarman et al., 2024) juga menetapkan struktur musiman basah/kering wilayah ini, namun tidak menerjemahkannya ke dalam istilah radiasi matahari permukaan atau indeks langit-cerah yang relevan untuk perencanaan energi surya.

Berdasarkan uraian tersebut, masih terdapat kesenjangan penelitian berupa belum tersedianya kajian yang memanfaatkan data grid nasional dekadal periode 2016–2025 untuk mengevaluasi keterkaitan antara kondisi awan dan radiasi matahari permukaan secara menyeluruh di wilayah Indonesia. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memetakan klimatologi musiman radiasi matahari permukaan, tutupan awan total, dan indeks langit-cerah di seluruh wilayah Indonesia selama periode 2016–2025 menggunakan data ERA5, mengklasifikasikan kondisi awan pada setiap grid-bulan dan mengkuantifikasi distribusi radiasi matahari yang dihasilkan pada masing-masing kategori dan musim, serta menganalisis hubungan spasial antara variabilitas antar-tahun radiasi matahari dan tutupan awan untuk mengidentifikasi wilayah yang paling sensitif terhadap perubahan kondisi awan dalam kaitannya dengan potensi sumber daya surya Indonesia.

B. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan data reanalisis bulanan ERA5 (Hersbach et al., 2020) yang diperoleh dari Copernicus Climate Data Store untuk periode 2016–2025, mencakup seluruh domain Indonesia (6°LU–11°LS, 95°BT–141°BT) dengan resolusi spasial 0,25°. Tiga variabel utama digunakan dalam penelitian ini, yaitu surface solar radiation downwards (SSRD), surface solar radiation downward clear-sky (SSRDC), dan total cloud cover (TCC), sebagaimana disajikan pada Tabel 1. Pendekatan berbasis grid nasional ini dipilih untuk mengatasi keterbatasan yang umum dijumpai pada evaluasi radiasi matahari berbasis stasiun tunggal di Indonesia, yang meskipun informatif secara lokal seperti pada evaluasi ERA5 di Provinsi Nusa Tenggara Timur menggunakan satu titik AWS (Taufiqi et al., 2025)—belum mampu menggambarkan pola spasial radiasi matahari dan tutupan awan untuk seluruh wilayah Indonesia secara musiman dan dekadal.

Tabel 1. Variabel ERA5 yang Digunakan dalam Penelitian

No	Variabel	Simbol	Satuan
1	Surface solar radiation downwards	SSRD	J/m²
2	Surface solar radiation downward clear-sky	SSRDC	J/m²
3	Total cloud cover	TCC	fraksi (0–1)

Tahap pra-pemrosesan data diawali dengan mengonversi variabel radiasi yang bersifat akumulatif (J/m²) menjadi fluks daya rata-rata (W/m²) dengan membagi 86.400 detik/hari. Selanjutnya, dua variabel turunan dihitung untuk mengkuantifikasi peredaman radiasi oleh awan. Pertama, indeks langit-cerah (*clear-sky index*) dihitung sebagai:

$$CSI = \frac{SSRD}{SSRDC} \quad (1)$$

Kedua, efek radiatif awan (*cloud radiative effect*) dihitung sebagai:

$$CRE = SSRD - SSRDC \quad (2)$$

Indeks CSI merepresentasikan fraksi radiasi langit-cerah yang benar-benar mencapai permukaan, dengan CSI = 1 berarti tidak ada peredaman oleh awan, sedangkan CRE merepresentasikan besarnya kehilangan radiasi akibat awan dalam satuan W/m². Kedua variabel turunan ini kemudian digunakan bersama data mentah SSRD dan TCC pada tahap analisis selanjutnya.

Data dikelompokkan ke dalam empat musim meteorologi standar DJF, MAM, JJA, dan SON konsisten dengan kerangka musiman yang digunakan pada kajian iklim curah hujan Indonesia terkini (Ariska et al., 2024; Sudarman et al., 2024). Karena penelitian ini hanya menggunakan data bulanan (bukan data harian atau sub-harian), kondisi awan diklasifikasikan pada level grid-bulan menggunakan ambang tersil (33% dan 67%) dari TCC di seluruh domain dan periode penelitian, menghasilkan tiga kategori, yaitu *Cerah* (TCC rendah), *Sedang*,

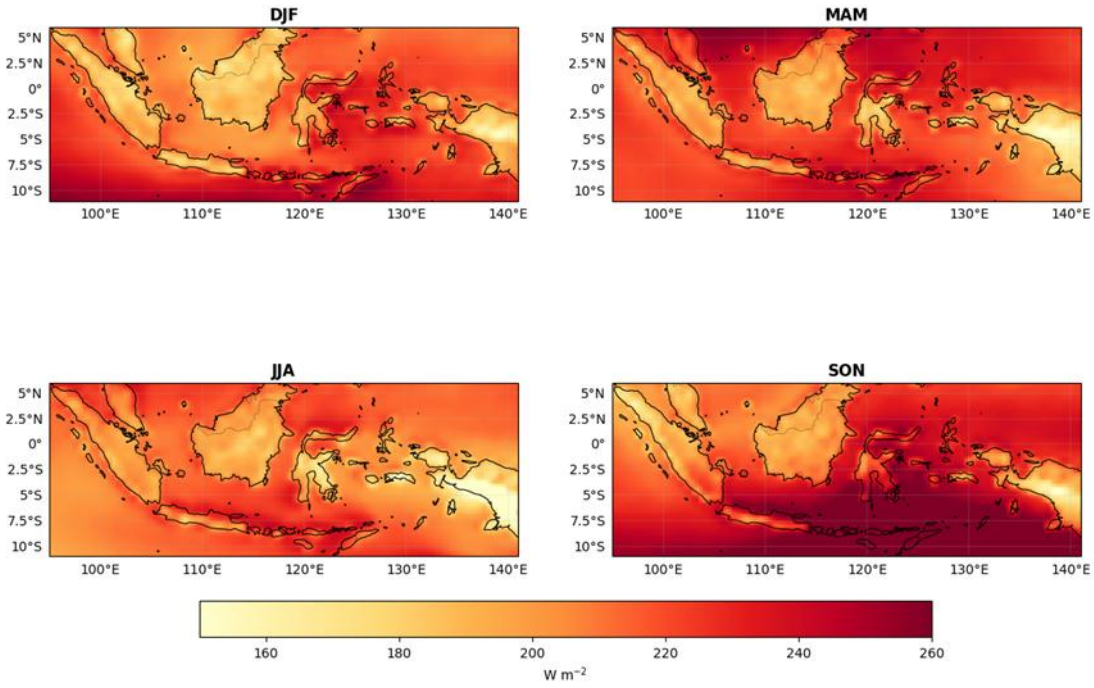
dan *Berawan* (TCC tinggi). Pendekatan klasifikasi berbasis tersil ini dipilih sebagai proksi sederhana namun terukur untuk membedakan kondisi awan antarwilayah dan antarmusim, mengingat parameterisasi tutupan awan pada produk reanalisis diketahui menjadi salah satu sumber bias utama dalam estimasi radiasi matahari (Taufiqi et al., 2025; Zhang et al., 2016).

Analisis data dilakukan melalui beberapa tahap. Peta klimatologi musiman (rata-rata 2016–2025) dibuat untuk SSRD, TCC, dan CSI guna menggambarkan pola spasial radiasi dan awan di seluruh Indonesia. Distribusi SSRD kemudian dibandingkan antarmusim dan antarkategori awan menggunakan boxplot untuk menilai signifikansi perbedaan radiasi pada tiap kategori. Deret waktu bulanan rata-rata domain (2016–2025) untuk SSRD dan TCC juga diperiksa untuk melihat tren dan variabilitas antar-tahun. Selanjutnya, korelasi spasial Pearson dihitung antara SSRD dan TCC menggunakan 10 nilai tahunan pada setiap musim untuk setiap grid dan musim, mengikuti pendekatan evaluasi statistik (korelasi, bias, dan kesalahan) yang juga digunakan pada studi reanalisis radiasi matahari sebelumnya di Indonesia (Sianturi et al., 2020; Taufiqi et al., 2025; Wu et al., 2023). Seluruh pemrosesan data dan visualisasi spasial dilakukan menggunakan Python, memanfaatkan pustaka xarray untuk pengolahan data grid dan cartopy untuk pemetaan spasial.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pola Spasial Musiman Radiasi Matahari Permukaan

Gambar 1 memperlihatkan sebaran SSRD yang tidak merata di seluruh Indonesia. Sumatra, Kalimantan, dan Sulawesi umumnya berada pada kisaran terendah, 150–190 W/m², sementara Nusa Tenggara, Papua bagian selatan, dan sebagian Maluku menerima radiasi paling tinggi, khususnya pada JJA dan SON. Perbedaan ini mengikuti kontras curah hujan monsun barat–timur yang sudah cukup dikenal: wilayah barat lebih lama berada dalam rezim awan musim basah, sedangkan wilayah timur lebih banyak terpapar monsun kering (Ariska et al., 2024; Sudarman et al., 2024). Kontras ini paling tajam saat JJA, saat ITCZ bergeser ke utara dan memusatkan aktivitas konvektif di bagian barat-tengah Indonesia, sehingga wilayah tenggara menjadi relatif kering dan cerah pada periode tersebut.

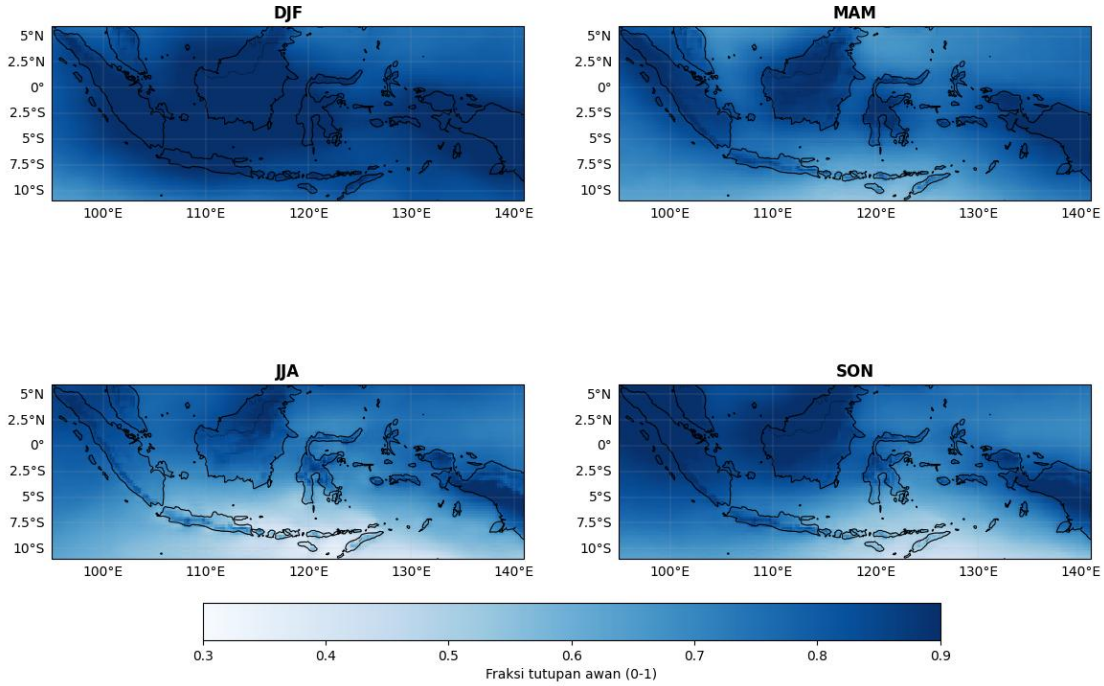


Gambar 1. Peta spasial SSRD 4 musim (DJF/MAM/JJA/SON)

2. Pola Musiman Tutupan Awan

Peta TCC pada Gambar 2 menampilkan pola yang berkebalikan dengan SSRD. Fraksi awan tertinggi (0,7–0,9) muncul di pulau-pulau barat dan tengah selama MAM dan JJA, bertepatan dengan pergeseran ITCZ dan transisi monsun Asia–Australia, sementara wilayah selatan domain (kira-kira selatan 7,5°LS) jauh lebih cerah pada JJA dan SON akibat udara kering yang turun (subsidensi) pada fase monsun Australia. Kemiripan pola ini dengan hasil analisis curah hujan Indonesia menggunakan metode EOF yang menunjukkan sensitivitas tinggi curah hujan terhadap suhu muka laut di Samudra Hindia tenggara dan Pasifik tengah (Ariska et al., 2024)

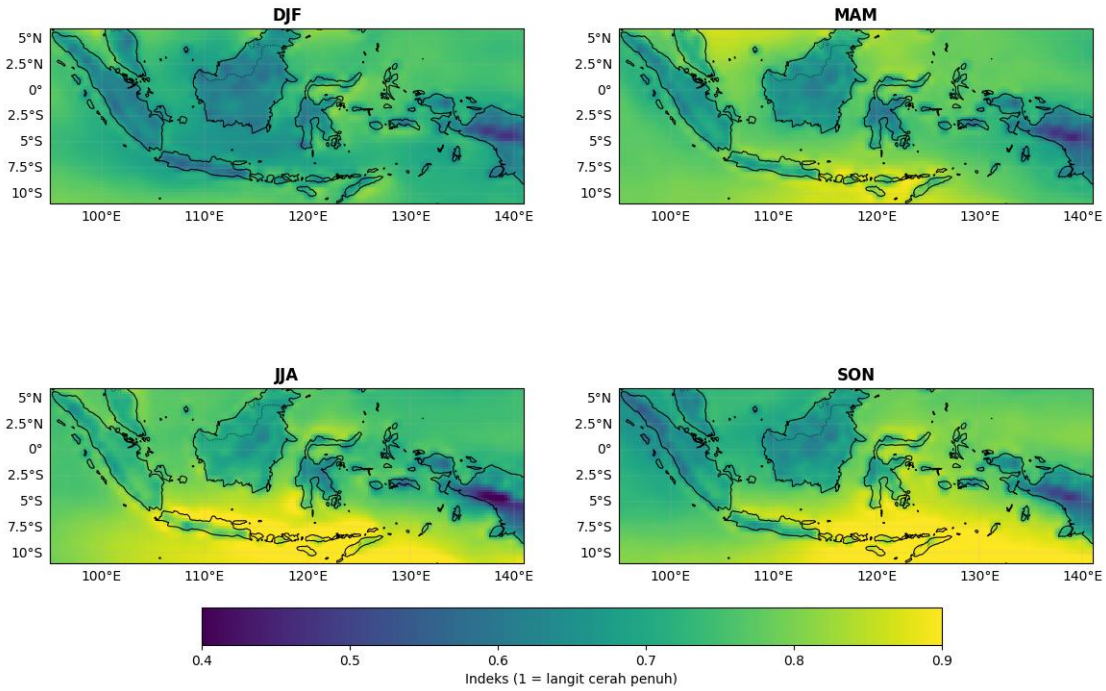
memberi indikasi bahwa variasi awan yang teramati bukan sekadar kebisingan spasial, melainkan mengikuti mekanisme iklim regional yang sama.



Gambar 2. Peta spasial TCC 4 musim

3. Indeks Langit-Cerah (Clear-Sky Index)

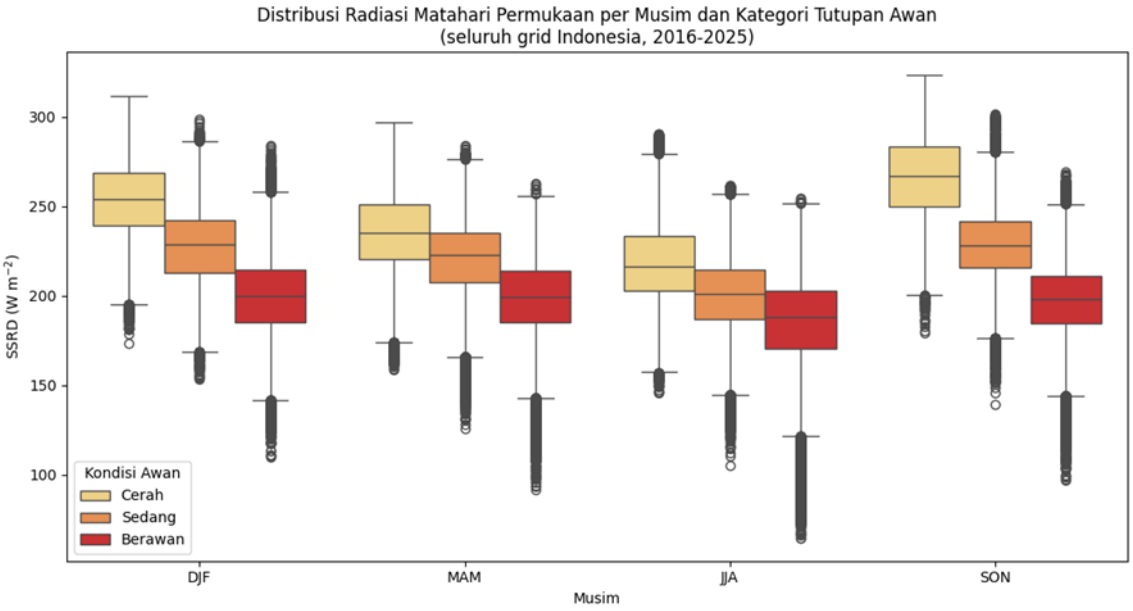
Indeks langit-cerah pada Gambar 3 menunjukkan seberapa besar radiasi yang hilang akibat awan dibanding potensi maksimalnya. Nilai di atas 0,8 terpusat di bagian selatan dan tenggara domain selama JJA dan SON—kondisi paling dekat dengan langit cerah penuh dan paling ideal untuk pemasangan PV. Di sabuk ekuator pada DJF dan MAM, indeks turun ke bawah 0,5–0,6, artinya lebih dari separuh potensi radiasi langit-cerah hilang akibat awan. Rentang ini sebanding dengan temuan bahwa estimasi radiasi berbasis ERA5 di Indonesia cenderung paling bias di sekitar ekuator (Sianturi et al., 2020), wilayah yang memang secara fisis paling sulit dimodelkan karena aktivitas konvektif yang tinggi dan berubah cepat.



Gambar 3. Peta clear-sky index 4 musim

4. Distribusi Radiasi Berdasarkan Kategori Awan

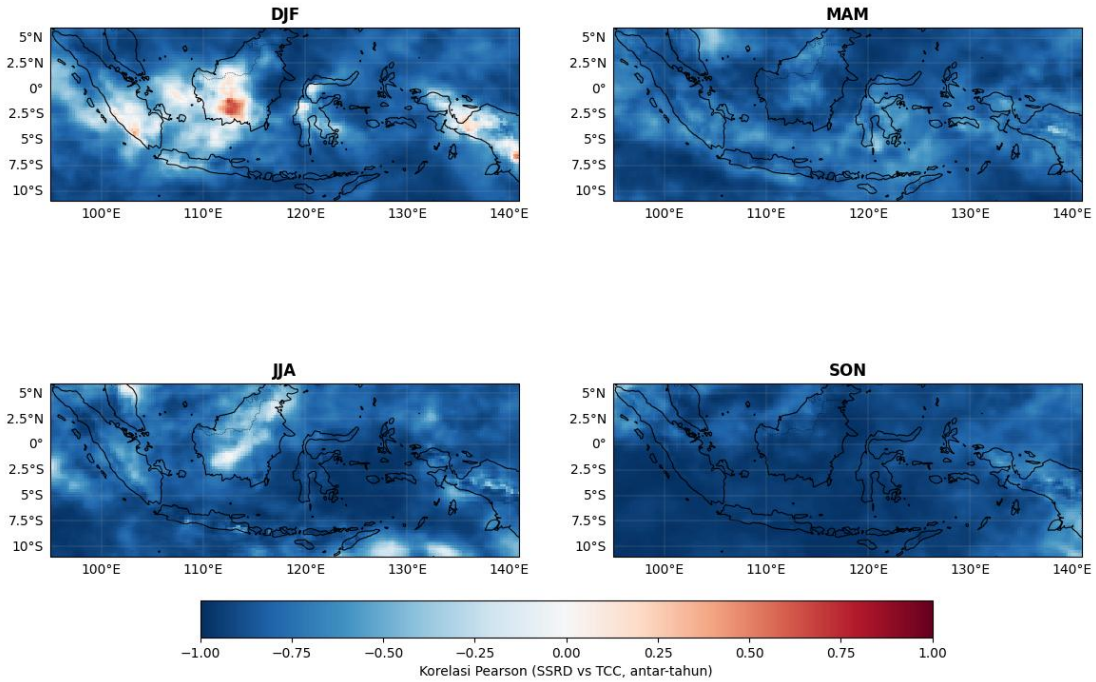
Boxplot pada Gambar 4 memperlihatkan selisih yang cukup jelas antarkategori awan. Median SSRD pada kondisi Cerah lebih tinggi 50–90 W/m² dibanding kondisi Berawan pada setiap musim, dengan selisih terbesar pada JJA dan terkecil pada MAM. Dengan kata lain, kategori awan saja sudah cukup untuk memperkirakan sebagian besar variasi radiasi pada suatu grid-bulan. Namun sebaran nilai di dalam tiap kategori—terutama "Berawan"—masih cukup lebar dan banyak pencilan. Kemungkinan besar tutupan awan total belum menangkap seluruh faktor yang memengaruhi radiasi, seperti jenis awan, ketebalan optik, atau kandungan uap air (Wu et al., 2023; Zhang et al., 2016).



Gambar 4. Boxplot SSRD per musim × kategori awan

5. Korelasi Spasial antara SSRD dan Tutupan Awan

Peta korelasi pada Gambar 5 didominasi warna biru (negatif) di hampir seluruh domain dan semua musim, artinya naik-turunnya tutupan awan dari tahun ke tahun menjadi faktor utama di balik naik-turunnya radiasi matahari permukaan. Korelasi negatif ini paling kuat pada MAM, JJA, dan SON. Pada DJF muncul beberapa titik korelasi positif lemah di sebagian Kalimantan dan Sulawesi. Ini kemungkinan dipengaruhi faktor lain di luar tutupan awan sederhana—kandungan uap air, aerosol, atau struktur vertikal awan konvektif—yang tidak terekam oleh TCC (Wu et al., 2023). Titik-titik seperti ini menunjukkan bahwa rata-rata tutupan awan bulanan tidak selalu cukup untuk menjelaskan peredaman radiasi di semua tempat, sehingga data resolusi lebih tinggi akan berguna untuk mendalaminya lebih lanjut.



Gambar 5. Peta korelasi spasial SSRD–TCC 4 musim

D. SIMPULAN DAN SARAN

Radiasi matahari permukaan di Indonesia berbeda cukup jauh antarmusim dan antarwilayah. Wilayah barat dan sekitar ekuator umumnya menerima radiasi lebih rendah karena tutupan awan yang lebih tebal dan bertahan lama, sedangkan pulau-pulau tenggara menerima radiasi jauh lebih besar, terutama pada JJA dan SON. Pola ini mengikuti struktur monsun Indonesia yang sudah diketahui, sehingga peredaman radiasi oleh awan lebih tepat dilihat sebagai siklus musiman yang berulang, bukan variasi acak.

Pengelompokan grid-bulan ke dalam kategori cerah, sedang, dan berawan menghasilkan perbedaan radiasi yang konsisten pada setiap musim, dan variabilitas antar-tahun SSRD berkorelasi kuat serta negatif dengan variabilitas TCC di sebagian besar wilayah. Meski begitu, beberapa titik pengecualian—khususnya pada DJF di sebagian Kalimantan dan Sulawesi—menunjukkan bahwa tutupan awan bulanan saja belum cukup menjelaskan peredaman radiasi di semua tempat. Secara umum, hasil ini memberi gambaran cukup jelas mengenai wilayah dan musim mana yang paling berpotensi untuk pengembangan PV skala utilitas di Indonesia.

Penelitian lanjutan sebaiknya menggunakan data ERA5 resolusi jam atau harian agar siklus diurnal awan dan kejadian konvektif jangka pendek—yang tidak tertangkap pada data bulanan—bisa dianalisis lebih detail. Validasi terhadap stasiun radiasi matahari BMKG di berbagai wilayah juga perlu dilakukan untuk mengetahui seberapa besar bias lokal memengaruhi hasil ini. Selain itu, menambahkan informasi jenis awan (rendah, menengah, tinggi), bukan hanya tutupan awan total, kemungkinan akan meningkatkan akurasi prediksi radiasi, mengingat tutupan awan total terbukti belum cukup menjelaskan seluruh variasi SSRD pada beberapa wilayah dan musim. Terakhir, peta musiman semacam ini sebaiknya dimasukkan ke dalam dokumen perencanaan energi terbarukan nasional agar penempatan PV bisa mempertimbangkan variabilitas sumber daya surya secara lebih tepat, baik dari sisi lokasi maupun waktu.

REFERENSI

Ariska, M., Suhadi, Supari, Irfan, M., & Iskandar, I. (2024). Spatio-temporal variations of Indonesian rainfall and their links to Indo-Pacific modes. Atmosphere, 15(9), 1036. https://doi.org/10.3390/atmos15091036

Ariyadi, S. B., & Purwanto, W. (2024). Development strategies for grid-connected utility-scale solar photovoltaic to increase renewable energy penetration. CSID Journal of Infrastructure Development, 7(3). https://doi.org/10.7454/jid.v7.i3.1164

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J.,

Bonavita, M., … Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730), 1999–2049. https://doi.org/10.1002/qj.3803

International Energy Agency. (2023). Enhancing Indonesia's power system [Report]. IEA. https://www.iea.org/reports/enhancing-indonesias-power-system

Irwandi, H., Rosid, M. S., & Mart, T. (2023). Effects of climate change on temperature and precipitation in the Lake Toba region, Indonesia, based on ERA5-Land data with quantile mapping bias correction. Scientific Reports, 13, Article 2564. https://doi.org/10.1038/s41598-023-29592-y

Langer, J., Kwee, Z., Zhou, Y., Isabella, O., Ashqar, Z., Quist, J., Praktiknjo, A., & Blok, K. (2023). Geospatial analysis of Indonesia's bankable utility-scale solar PV potential using elements of project finance. Energy, 283, 128555. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128555

Nurdiati, S., Sopaheluwakan, A., Septiawan, P., & Ardhana, M. R. (2022). Joint spatio-temporal analysis of various wildfire and drought indicators in Indonesia. Atmosphere, 13(10), 1591. https://doi.org/10.3390/atmos13101591

Paradongan, H. T., Hakam, D. F., Wiryono, S. K., Prahastono, I., Aditya, I. A., Banjarnahor, K. M., Sinisuka, N. I., & Asekomeh, A. (2024). Techno-economic feasibility study of solar photovoltaic power plant using RETScreen to achieve Indonesia energy transition. Heliyon, 10(6), e27680. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27680

Regulatory Assistance Project. (2025). Meeting Indonesia's 100 GW solar PV goal: International lessons and policy opportunities [Report]. RAP. https://www.raponline.org/knowledge-center/meeting-indonesias-100-gw-solar-pv-goal-international-lessons-policy-opportunities/

Safaat, Y. Y., & Samputra, P. L. (2026). Barriers to the implementation of renewable energy policies in Indonesia: A case study of solar energy in improving energy security. ARMADA: Jurnal Penelitian Multidisiplin, 4(5), 455–463. https://doi.org/10.55681/armada.v4i5.2038

Sianturi, Y., Marjuki, & Sartika, K. (2020). Evaluation of ERA5 and MERRA2 reanalyses to estimate solar irradiance using ground observations over Indonesia region. AIP Conference Proceedings, 2223(1), 020002. https://doi.org/10.1063/5.0000854

Sudarman, G. G., Hadi, T. W., Ningsih, N. S., Sopaheluwakan, A., Syahputra, M. R., & Marpaung, F. (2024). Nonstationary changes in annual rainfall over Indonesia's Maritime Continent. Advances in Meteorology, 2024, Article 9392844. https://doi.org/10.1155/2024/9392844

Tarigan, E. (2025). Role of solar photovoltaic energy in GHG emission reduction within Indonesia's long-term strategy for low carbon and climate resilience 2050. International Journal of Energy Economics and Policy, 15(2), 421–428. https://doi.org/10.32479/ijeep.18352

Taufiqi, R. I., Alzahra, A. H., & Purwanto, K. A. (2025). Evaluasi reanalysis solar radiation product untuk estimasi intensitas radiasi matahari saat peralihan monsun di Nusa Tenggara Timur periode 2023–2024. El-Jughrafiyah, 5(1), 13–23.

Urraca, R., Huld, T., Gracia-Amillo, A., Martinez-de-Pison, F. J., Kaspar, F., & Sanz-Garcia, A. (2018). Evaluation of global horizontal irradiance estimates from ERA5 and COSMO-REA6 reanalyses using ground and satellite-based data. Solar Energy, 164, 339–354. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.059

Wilczak, J. M., Akish, E., Capotondi, A., & Compo, G. P. (2024). Evaluation and bias correction of the ERA5 reanalysis over the United States for wind and solar energy applications. Energies, 17(7), 1667. https://doi.org/10.3390/en17071667

Wu, H., Xu, X., Luo, T., Yang, Y., Xiong, Z., & Wang, Y. (2023). Variation and comparison of cloud cover in MODIS and four reanalysis datasets of ERA-Interim, ERA5, MERRA-2 and NCEP. Atmospheric Research, 281, 106477. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106477

Zhang, X., Liang, S., Wang, G., Yao, Y., Jiang, B., & Cheng, J. (2016). Evaluation of the reanalysis surface incident shortwave radiation products from NCEP, ECMWF, GSFC, and JMA using satellite and surface observations. Remote Sensing, 8(3), 225. https://doi.org/10.3390/rs8030225