



Pemanfaatan Metode *Merged-IMSRA* dalam Peningkatan Estimasi Curah Hujan Berbasis Satelit saat Kejadian *Mesoscale Convective System* (MCS) di Bali

Rayhan Rafi^{1*}, Yosafat Donni Haryanto¹, Adi Mulsandi¹, Latifah N Qomariyatuazzamzami¹

¹ Departemen Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, Tangerang, Indonesia

DOI: <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i3.2314>

Article Info:

Received : 16 Juni 2026
Revised : 27 Juni 2026
Accepted : 01 Juli 2026
Published : 05 Juli 2026

Correspondence:

Rayhan Rafi

Phone: +6287838683780

Abstract: Mesoscale Convective System (MCS) is one of the primary causes of extreme rainfall events in tropical regions, as occurred in Bali on 8–10 September 2025, which resulted in a significant hydrometeorological disaster. This study aims to evaluate the capability of the Merged Indian National Satellite System Multi-Spectral Rainfall Algorithm (M-IMSRA) in estimating the spatial and temporal distribution of rainfall during the MCS event. M-IMSRA was developed through several sequential stages: IMSRA (IMR), polynomial bias correction (IMC), event-based orographic correction using GSMaP MVK ratios, cloud growth correction, and assimilation of 31 BMKG AWS/ARG observation points using the Cressman scheme. Validation was conducted using the Pearson correlation coefficient (r), Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), and bias. The results show that M-IMSRA accurately mapped the spatial evolution of the MCS, with extreme rainfall accumulation (210–300 mm) concentrated in the central-eastern mountainous region of Bali during the peak phase, consistent with orographic lifting mechanisms. Statistical validation indicated moderate to very high correlation across all event phases ($r = 0.663$ – 0.941), accompanied by low RMSE and MAE values and a small, consistent bias (-0.08 to -0.36 mm). It is concluded that M-IMSRA is an accurate rainfall estimation method with strong potential for operational implementation in hydrometeorological disaster monitoring and early warning systems in Indonesian archipelagic regions with limited surface observation networks.

Keywords: Bali; Mesoscale Convective System; Merged-IMSRA; Flood; Satellite.

Citation: Rafi, R., Haryanto, Y. D., Mulsandi, A., & Nurul Qomariyatuazzamzami, L.N. (2026). Pemanfaatan Metode Merged-IMSRA dalam Peningkatan Estimasi Curah Hujan Berbasis Satelit saat Kejadian Mesoscale Convective System (MCS) di Bali: -. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 7(3), 3122–3128. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i3.2314>

Pendahuluan

Pada 9 September 2025, Pulau Bali dilanda hujan ekstrem yang mengakibatkan banjir. BPBD melaporkan bahwa curah hujan sangat tinggi tersebut menyebabkan 18 korban meninggal, 4 orang hilang, 6.309 warga terdampak, 619 fasilitas umum terdampak, 520 bangunan rusak, serta 2.380 rumah mengalami kerusakan. Berdasarkan laporan BMKG, curah hujan harian tercatat antara 250–385 mm per hari, yang termasuk kategori ekstrem. Bencana ini memengaruhi 18 kecamatan di enam kabupaten dan satu kota, yaitu Badung, Tabanan, Karangasem, Jembrana, Gianyar,

Klungkung, dan Kota Denpasar (Badan Nasional Penanggulangan Bencana, 2025). Dalam melakukan pengamatan terhadap cuaca ekstrem seperti MCS di Bali, tentu diperlukan sebuah peralatan dan sistem penginderaan jauh untuk bisa mendeteksi kejadian atmosfer secara *real time*, salah satunya adalah satelit cuaca (Adiningsih et al., 2016). Pemanfaatan satelit cuaca dilakukan untuk memantau sebaran awan, hujan, dan kondisi atmosfer sangat penting dalam mendukung kerja prakirawan, terutama saat menentukan cuaca yang sudah terjadi, sedang berlangsung, maupun yang akan terjadi (Zakir et al., 2010). Di Indonesia, citra satelit

Himawari-9 digunakan sebagai satelit meteorologi geostasioner (GMS) yang telah beroperasi sejak 1983. Satelit ini mencakup wilayah Asia bagian timur hingga Australia, serta sebagian kawasan kutub dan perairan Samudra Hindia hingga Pasifik Barat. Satelit yang dikelola *Japan Meteorological Agency* (JMA) dan dibekali sensor *Advanced Himawari Imager* (AHI) yang mampu menyediakan informasi temporal, spektral, dan spasial. Data yang dihasilkan diklasifikasikan melalui 16 kanal band sesuai kebutuhan pengguna (Kushardono, 2012).

Tantangan utama dalam mitigasi bencana hidrometeorologi adalah keterbatasan data observasi permukaan (Mulsandi et al., 2019). Oleh karena itu mulai banyak perkembangan *numerical model* dan presipitasi satelit global (SPPs) untuk memberikan pengukuran data berupa estimasi curah hujan berbasis numerik untuk membantu ketersediaan data temporal ataupun spasial yang baik (Gao et al., 2024; Pratama et al., 2022).

Estimasi curah hujan berbasis satelit berkembang pesat dalam satu dekade terakhir dalam mengembangkan algoritma dan komputasi gabungan di dalamnya (Upadhyaya & Ramsankaran, 2016). Menurut Levizzani et al. (2002), tujuan utama estimasi curah hujan adalah mengetahui perkiraan dan distribusi curah hujan yang ada pada suatu wilayah, terutama untuk menutupi wilayah yang tidak terukur oleh data *ground* seperti alat penakar curah hujan.

Metode IMSRA merupakan salah satu metode estimasi curah hujan konvensional berbasis satelit yang menggunakan kanal IR. Menurut Khan et al. (2021), IMSRA dikembangkan oleh Gairola et al. (2010) sebagai sistem algoritma estimasi curah hujan di India. Pada penelitian terbaru oleh Silalahi et al. (2024) terkhusus Pulau Bali, mengemukakan bahwa IMSRA adalah metode konvensional terbaik yang digunakan sebagai estimasi curah hujan karena menunjukkan kesalahan paling minim.

Meskipun menjadi metode terbaik, faktanya IMSRA *Rainfall* atau IMR (penggunaan bahasa lain untuk menyebut metode IMSRA) masih memiliki banyak bias yang perlu diperbaiki (Upadhyaya & Ramsankaran, 2016). IMSRA memiliki kecenderungan *overestimate* sehingga dikembangkan metode lanjutan bernama *INSAT Multi-Spectral Corrected* (IMC) yang memberikan kinerja lebih baik (Khan et al., 2021). Sejalan dengan itu, penelitian tersebut dikembangkan kembali oleh Vijayalakshmi (2023) dan menemukan pembaruan metode bernama *Merged-IMSRA* (M-IMSRA) sebagai metode pembaruan IMR dan IMC yang memiliki korelasi dan kinerja terbaik.

Namun, validasi M-IMSRA oleh Vijayalakshmi (2023) tersebut dilakukan pada studi kasus Siklon Tropis Gaja di wilayah India, sehingga efektivitasnya belum diketahui ketika diterapkan pada karakteristik konvektif dan topografi kepulauan tropis seperti Indonesia. Di sisi

lain, penelitian Silalahi dkk. (2024) di Bali baru menguji metode estimasi konvensional dan machine learning, namun belum mengevaluasi pendekatan merging M-IMSRA yang mengintegrasikan koreksi orografis dan asimilasi data observasi permukaan.

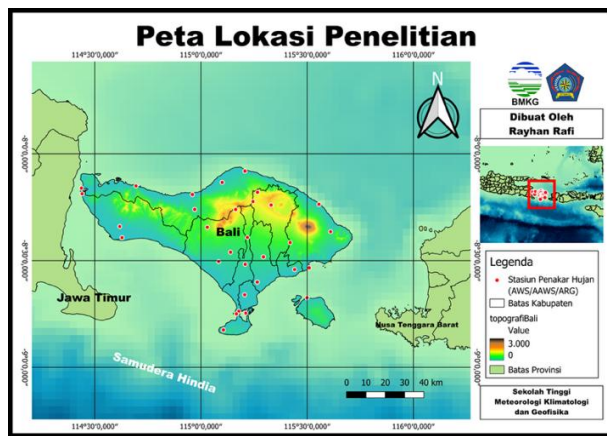
Penelitian ini mengusulkan penerapan M-IMSRA sebagai upaya untuk mengevaluasi efektivitas metode tersebut pada kejadian *Mesoscale Convective System* (MCS) di Bali yang memiliki karakteristik konvektif tropis dan topografi kepulauan berbeda dengan wilayah pengembangan awal metode ini di India. Pada penelitian ini memiliki penambahan metode yang terletak pada koreksi paralaks satelit himawari dan penerapan koreksi orografis berbasis kejadian (event-based) yang disesuaikan dengan kondisi topografi kepulauan Bali, serta evaluasi langsung performa M-IMSRA terhadap jaringan stasiun penakar hujan otomatis (AWS/ARG) BMKG selama kejadian cuaca ekstrem aktual. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat mengisi kekosongan kajian mengenai adaptasi metode M-IMSRA di luar wilayah pengembangan aslinya, sekaligus meningkatkan akurasi estimasi curah hujan saat kejadian bencana hidrometeorologi di Bali.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan jenis penelitian deskriptif komparatif (Djollong, 2014; Abdillah et al., 2024; Sujarweni, 2014). Variabel utama yang dianalisis adalah estimasi curah hujan berbasis satelit Himawari-9 yang diolah menggunakan algoritma *Merged Indian National Satellite System Multi-Spectral Rainfall Algorithm* (M-IMSRA). Pendekatan deskriptif digunakan untuk memetakan distribusi spasial dan temporal curah hujan saat kejadian *Mesoscale Convective System* (MCS), sedangkan pendekatan komparatif digunakan untuk mengevaluasi tingkat akurasi hasil estimasi M-IMSRA terhadap data observasi permukaan melalui parameter statistik koefisien korelasi (r), *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), dan bias (*Mean Error*).

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan di Provinsi Bali yang terletak pada koordinat 8,0°–9,0° LS dan 114,4°–115,8° BT. Topografi Bali yang kompleks, dengan rangkaian pegunungan di bagian tengah pulau, menjadikan wilayah ini relevan untuk menguji efektivitas koreksi bias orografis pada algoritma M-IMSRA. Kajian difokuskan pada kejadian MCS yang melanda Bali pada 8–10 September 2025, mencakup fase pra-kejadian, puncak aktivitas konvektif, dan fase peluruhan sistem.



Gambar 1. Peta Lokasi penelitian.

Data Hasil Penelitian

Data utama yang digunakan adalah suhu puncak awan (*Top of Brightness Temperature*, TBB) dari Satelit Himawari-9 kanal inframerah Band 13 (10,4 μm), dengan resolusi spasial 0,02° (~2 km) dan resolusi temporal 30 menit (Kushardono, 2012). Sebagai data pendukung dalam proses koreksi bias orografis, digunakan data *Global Satellite Mapping of Precipitation* (GSMaP) produk MVK versi 8 dengan resolusi spasial 0,1° (~11 km) dan temporal 1 jam; data ini berperan sebagai referensi rasio koreksi orografis berbasis kejadian (*event-based*), bukan sebagai produk pembandingan independen. Data validasi menggunakan curah hujan observasi dari 31 titik stasiun penakar hujan *Automatic Weather Station/Automatic Rain Gauge* (AWS/ARG) BMKG yang aktif dan tersebar di Pulau Bali, diakses melalui laman resmi AWS Center BMKG.

Teknik Analisis Data

Estimasi curah hujan M-IMSRA dibangun melalui lima tahap koreksi berurutan terhadap data TBB Himawari-9. Tahap pertama, estimasi curah hujan awal dihitung menggunakan algoritma empiris IMSRA (IMR) berdasarkan hubungan suhu puncak awan dengan intensitas hujan (Gairola et al., 2010).

$$R_{\text{IMR}} = 8,613098 \times e^{[-(TBB-197,97)/15,7061]}$$

Tahap kedua, dilakukan koreksi bias sistematik global melalui regresi polinomial orde-2 untuk mengatasi kecenderungan IMR yang *underestimate* pada hujan lebat.

$$R_{\text{IMC}} = 1,7542 \times R_{\text{IMR}} + 0,0272 \times R_{\text{IMR}}^2 - 0,2247$$

Tahap ketiga, koreksi orografis berbasis kejadian (*event-based*) diterapkan dengan meminjam pola rasio curah hujan dari data GSMaP MVK. Faktor koreksi orografis (F_{oro}) dihitung dari rasio akumulasi GSMaP terhadap akumulasi IMC selama periode kejadian.

$$F_{\text{oro}} = \Sigma P_{\text{GSMaP}(t)} / \Sigma P_{\text{IMC}(t)}$$

$$R_{\text{oro}} = R_{\text{IMC}} \times F_{\text{oro}}$$

Tahap keempat, koreksi pertumbuhan awan diterapkan untuk menangkap fase pertumbuhan dan peluruhan awan melalui indeks pendinginan (*cooling index*).

$$\Delta T = TBB(t) - TBB(t-30 \text{ menit})$$

Tahap kelima, hasil estimasi satelit diasimilasikan dengan data observasi permukaan AWS/ARG menggunakan metode analisis objektif Cressman Bhowmik & Das (2007), dengan fungsi pembobotan jarak.

$$W_i = (R^2 - d_i^2) / (R^2 + d_i^2), \text{ untuk } d \leq R$$

$$R_{\text{merged}} = R_{\text{sat}} + [\Sigma W_i (R_{\text{aws},i} - R_{\text{sat},i})] / \Sigma W_i$$

Di mana W_i adalah bobot stasiun ke- i , d_i adalah jarak horizontal grid satelit ke stasiun, dan R adalah radius pengaruh. Sebagai tahap penyempurna, dilakukan koreksi paralaks untuk mengatasi pergeseran posisi piksel akibat sudut pandang satelit geostasioner yang tidak tegak lurus terhadap permukaan bumi, mengikuti pendekatan geometri garis pandang satelit (Radová & Seidl, 2008).

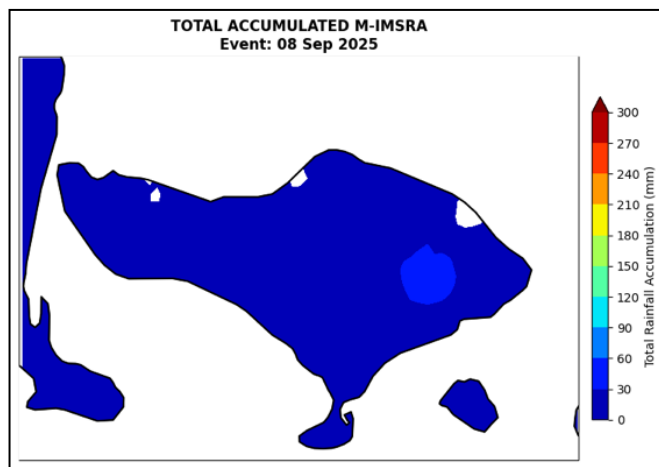
Teknik Validasi

Akurasi hasil estimasi M-IMSRA dievaluasi terhadap data observasi AWS/ARG menggunakan empat parameter statistik standar verifikasi curah hujan satelit (Wilks, 2006): koefisien korelasi Pearson (r), *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), dan bias (*Mean Error*). Kategori tingkat hubungan korelasi mengacu pada kriteria Guilford dan Fruchter (1978), dengan nilai $r < 0,20$ dikategorikan sangat rendah, 0,20–0,40 rendah, 0,40–0,70 sedang, 0,70–0,90 tinggi, dan $> 0,90$ sangat tinggi.

Hasil dan Diskusi

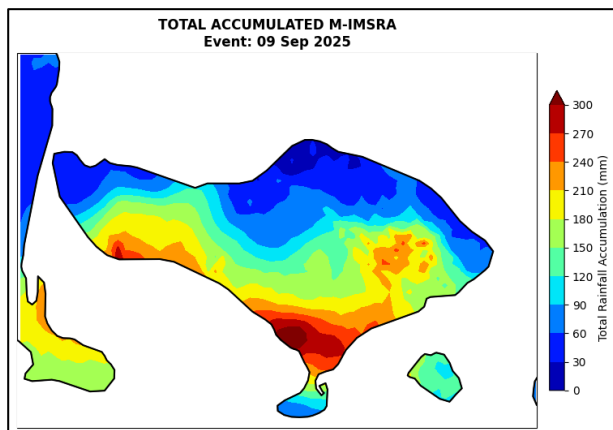
Distribusi Spasial M-IMSRA selama Kejadian MCS

Profil curah hujan M-IMSRA diamati selama tiga hari berturut-turut, yaitu 8, 9, dan 10 September 2025 yang masing-masing merepresentasikan fase pra-kejadian, puncak, dan pasca-kejadian *Mesoscale Convective System* (MCS) di Bali.



Gambar 2. Distribusi Spasial M-IMSRA saat pra Kejadian MCS

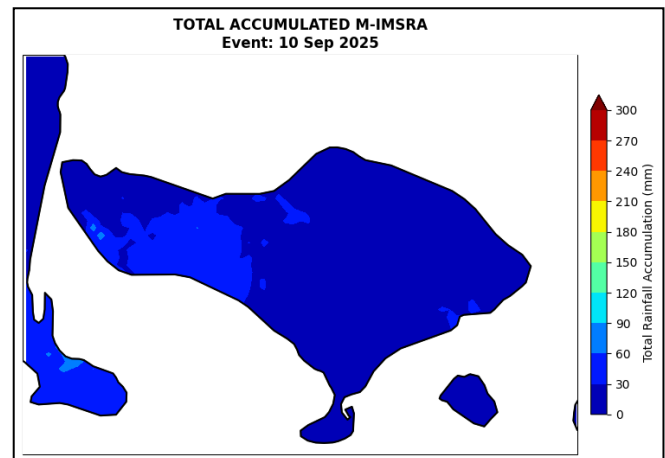
Pada 8 September ditunjukkan pada gambar 2, akumulasi hujan terkonsentrasi di wilayah tengah-timur Bali dengan intensitas ringan hingga sedang (30–60 mm/hari), sementara wilayah pesisir utara dan timur teramati relatif kering. Sinyal presipitasi awal ini berhasil ditangkap M-IMSRA berkat kombinasi resolusi tinggi Himawari-9 ($0,02^\circ/2$ km) dan asimilasi data observasi permukaan melalui skema Cressman yang memungkinkan deteksi variabilitas hujan lokal sekalipun pada intensitas rendah.



Gambar 3. Distribusi Spasial M-IMSRA saat Puncak Kejadian MCS

Pada 9 September (gambar 3), yang merupakan puncak aktivitas konvektif MCS, distribusi curah hujan meluas signifikan mencakup hampir seluruh bagian tengah, barat, dan selatan Bali dengan akumulasi harian mencapai 90–300 mm yang masuk kategori hujan ekstrem dan berpotensi memicu bencana hidrometeorologi seperti banjir. Nilai akumulasi tertinggi (210–300 mm) terkonsentrasi secara spesifik di wilayah pegunungan tengah-timur Bali, berdekatan dengan kompleks Gunung Agung dan Gunung Batur. Pola ini secara fisis konsisten dengan mekanisme

pengangkatan orografis (*upslope flow*) yang memperkuat presipitasi saat sistem konvektif melintasi topografi tinggi. M-IMSRA dapat menangkap pola spasial hujan dari tiga komponen algoritma, yakni resolusi tinggi sensor Himawari-9, koreksi bias orografis berbasis kejadian (*event-based*) yang dibawa dari data GSMap MVK, serta asimilasi observasi AWS yang mengikat estimasi satelit pada kondisi *ground truth*.



Gambar 4. Distribusi Spasial M-IMSRA saat Pasca Kejadian MCS

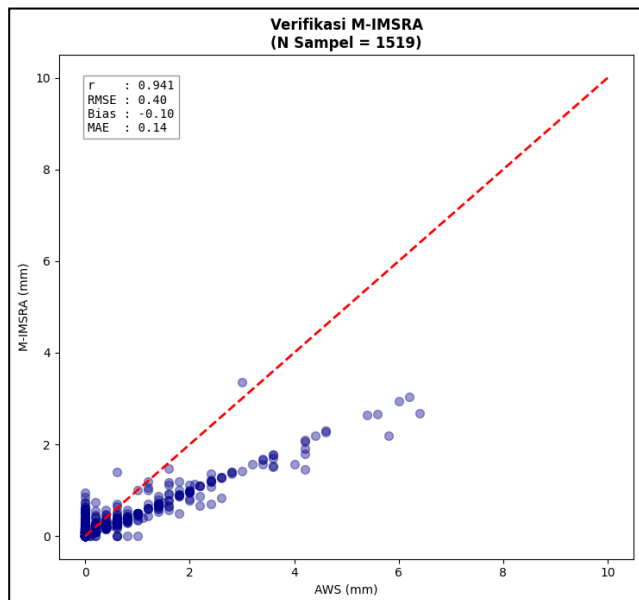
Pada 10 September ditunjukkan pada gambar 4, aktivitas konvektif mereda secara signifikan dan area tutupan hujan menyusut, terisolasi pada sebagian kecil wilayah tengah hingga barat Bali dengan intensitas menengah (60–90 mm). Pola presipitasi ini konsisten dengan karakteristik fase peluruhan MCS, di mana sel-sel konvektif aktif telah runtuh namun wilayah *stratiform* residual atau ringan masih menghasilkan presipitasi ringan hingga menengah. Evolusi spasial dari fase pra-kejadian, puncak, hingga peluruhan ini menunjukkan kemampuan M-IMSRA dalam memetakan siklus hidup sistem MCS secara kontinu dan fisis-konsisten dengan topografi Pulau Bali.

Validasi Statistik M-IMSRA terhadap Data Penakar Hujan

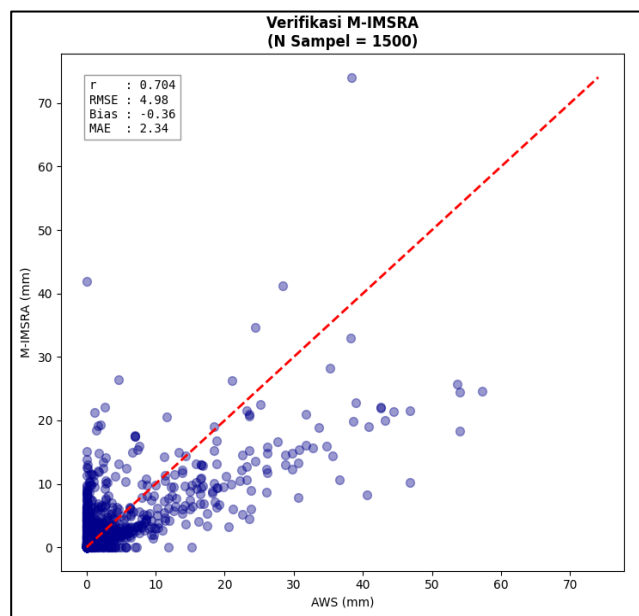
Untuk mengukur akurasi estimasi secara kuantitatif, dilakukan validasi statistik M-IMSRA terhadap data 31 stasiun penakar hujan otomatis (AWS/ARG) BMKG di Bali pada masing-masing fase kejadian.

Pada fase pra-kejadian (8 September) ditunjukkan pada gambar 5, M-IMSRA mencatat koefisien korelasi Pearson tertinggi sepanjang periode kajian, yaitu $r = 0,941$ ($N = 1.519$) di mana masuk kategori "sangat tinggi, hubungan sangat meyakinkan" berdasarkan kriteria Guilford dan Fruchter (1978). Nilai RMSE sebesar 0,40 mm, MAE 0,14 mm, dan bias $-0,10$ mm menunjukkan deviasi estimasi yang sangat kecil terhadap observasi,

membuktikan bahwa asimilasi AWS melalui skema Cressman efektif mengikat estimasi satelit pada kondisi permukaan bahkan pada intensitas hujan rendah.



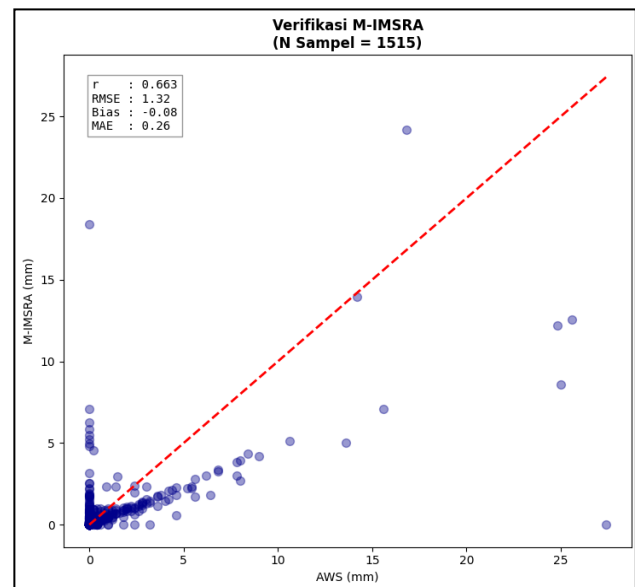
Gambar 5. Distribusi Nilai *Scatter Plots* M-IMSRA saat pra Kejadian



Gambar 6. Distribusi Nilai *Scatter Plots* M-IMSRA saat Puncak Kejadian

Pada fase puncak MCS (9 September) ditunjukkan pada gambar 6, korelasi mengalami penurunan menjadi $r = 0,704$ ($N = 1.500$), namun tetap berada pada kategori "tinggi, hubungan jelas". Penurunan ini merupakan respons fisis yang wajar mengingat kompleksitas dinamika awan meningkat tajam pada fase ini meliputi perubahan fase pertumbuhan awan yang cepat, interaksi antara wilayah konvektif dan *stratiform*, serta

variabilitas intensitas ekstrem pada skala sub-piksel yang menantang algoritma berbasis suhu puncak awan. RMSE meningkat menjadi 4,98 mm dan MAE 2,34 mm, sejalan dengan lonjakan intensitas hujan aktual pada hari tersebut, sementara bias -0.36 mm mengindikasikan kecenderungan *underestimate* ringan yang diduga berasal dari keterbatasan kerapatan jaringan AWS di wilayah pegunungan tempat aktivitas MCS terkonsentrasi.



Gambar 7. Distribusi Nilai *Scatter Plots* M-IMSRA saat Pasca Kejadian

Pada fase pasca-kejadian (10 September) ditunjukkan pada gambar 7, korelasi kembali menurun menjadi $r = 0,663$ ($N = 1.515$) di mana menjadi nilai terendah sepanjang periode kajian namun tetap dalam kategori "sedang". Tren penurunan korelasi yang progresif dari 0,941 menjadi 0,704 dan 0,663 ini mencerminkan peningkatan kompleksitas spasial presipitasi *stratiform* residual, yang bersifat lebih terfragmentasi dan kurang representatif ditangkap oleh jaringan AWS yang terkonsentrasi di dataran rendah. Meski demikian, nilai RMSE (1,32 mm), MAE (0,26 mm), dan bias ($-0,08$ mm) pada fase ini tetap rendah, menegaskan bahwa estimasi absolut M-IMSRA tetap mendekati nilai observasi meskipun korelasi pola spasialnya menurun.

Secara keseluruhan, M-IMSRA menunjukkan bias negatif yang kecil dan konsisten di seluruh fase ($-0,08$ hingga $-0,36$ mm), mengindikasikan kecenderungan *underestimate* ringan yang sistematis namun terkendali, bukan bias acak yang tidak terprediksi. Konsistensi RMSE dan MAE yang rendah di seluruh fase kejadian membuktikan bahwa pendekatan *merging* berbasis observasi permukaan melalui skema Cressman, dikombinasikan dengan koreksi orografis berbasis

kejadian, mampu menghasilkan estimasi curah hujan yang akurat sepanjang siklus hidup MCS mulai dari deteksi konvektif dini, pemetaan puncak hujan ekstrem yang fisis-konsisten dengan topografi, hingga identifikasi presipitasi residual pasca-sistem.

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengevaluasi kemampuan metode *Merged Indian National Satellite System Multi-Spectral Rainfall Algorithm* (M-IMSRA) dalam mengestimasi curah hujan saat kejadian *Mesoscale Convective System* (MCS) di Bali pada 8–10 September 2025. M-IMSRA terbukti mampu memetakan evolusi spasial siklus hidup MCS secara akurat, mulai dari deteksi sinyal presipitasi awal pada fase pra-kejadian, pemetaan akumulasi hujan ekstrem (210–300 mm) yang terkonsentrasi di wilayah pegunungan tengah-timur Bali.

Validasi statistik terhadap 31 stasiun AWS/ARG BMKG menunjukkan performa M-IMSRA yang konsisten baik di seluruh fase kejadian, dengan koefisien korelasi Pearson berkisar 0,663–0,941 (kategori sedang hingga sangat tinggi), RMSE 0,40–4,98 mm, MAE 0,14–2,34 mm, dan bias kecil yang konsisten negatif (–0,08 hingga –0,36 mm) yang mengindikasikan kecenderungan *underestimate* ringan namun terkendali. Penurunan korelasi yang progresif dari fase pra-kejadian ke pasca-kejadian mengindikasikan keterbatasan kerapatan jaringan AWS di wilayah pegunungan sebagai faktor utama, bukan kelemahan algoritma itu sendiri. Berdasarkan temuan tersebut, dapat disimpulkan bahwa M-IMSRA merupakan metode estimasi curah hujan berbasis satelit yang akurat dan andal untuk diterapkan di wilayah kepulauan Indonesia dengan topografi kompleks dan jaringan pengamatan permukaan yang terbatas (*blank spot area*). Integrasi resolusi tinggi Himawari-9, koreksi orografis berbasis kejadian, dan asimilasi data observasi melalui skema Cressman menjadikan M-IMSRA berpotensi diterapkan sebagai metode pendukung operasional BMKG dalam pemantauan dan peringatan dini bencana hidrometeorologi, khususnya pada kejadian MCS di wilayah dengan kerapatan stasiun pengamatan yang rendah.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG), atas segala masukan, saran, dan bantuan ilmiah yang telah diberikan selama proses penelitian hingga penyusunan artikel ini. Ucapan terima kasih secara khusus disampaikan kepada Dr. Yosafat Donni Haryanto, SP., M.Si. selaku dosen pembimbing, atas bimbingan, arahan, dan diskusi ilmiah yang sangat berarti dalam

penyempurnaan metodologi dan analisis penelitian ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) atas penyediaan data observasi curah hujan AWS/ARG yang menjadi bagian penting dalam proses validasi hasil penelitian.

Referensi

- Abdillah, L. A., Mappanyompa, Sabtohadji, J., Isma, A., Effiyaldi, Mulyodiputro, M. D., . . . Hasanuddin, R. (2024). Metode penelitian kuantitatif: Konsep dan aplikasi. Sumedang: Mega Press Nusantara.
- Adiningsih, E. S., Sofan, P., & Prasasti, I. (2016). Pemanfaatan teknologi penginderaan jauh untuk monitoring kejadian iklim ekstrem di Indonesia. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 10(2).
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2025). Info bencana: Data dan informasi kebencanaan bulanan teraktual. 6(9).
- Djollong, A. F. (2014). Teknik pelaksanaan penelitian kuantitatif. Istiqra: Jurnal Pendidikan dan Pemikiran Islam, 2(1).
- Gairola, R. M., Mahesh, C., & Bushair, M. T. (2016). Algorithm theoretical basis document-rainfall estimation (modified) (Report No. SAC/EPISA/AOSG/SR/12/2016). Space Applications Centre.
- Gairola, R. M., Mishra, A., Prakash, S., & Mahesh, C. (2010). Development of INSAT multi-spectral rainfall algorithm (IMSRA) for monitoring rainfall events over India using Kalpana-IR and TRMM precipitation radar observations (Report No. SAC/EPISA/AOSG/INSAT/SR-39/2010). Space Applications Centre.
- Gao, R., Li, L., Wang, Y., Li, W., Yun, Z., & Gai, Y. (2024). Improvements and limitations of the latest version 8 of GSMaP compared with its former version 7 and IMERG V06 at multiple spatio-temporal scales in mainland China. *Atmospheric Research*, 308, 107517.
- Khan, A. W., Mahesh, C., Bushair, M. T., & Gairola, R. M. (2021). Estimation and evaluation of rainfall from INSAT-3D improved IMSRA algorithm during 2018 summer monsoon season. *Journal of Earth System Science*, 130(1), 37.
- Kushardono, D. (2012). Kajian satelit penginderaan jauh cuaca generasi baru Himawari-8 dan Himawari-9. *Jurnal Inderaja*, 3(5).
- Levizzani, V., Amorati, R., & Meneguzzo, F. (2002). A review of satellite-based rainfall estimation methods (Report No. EVK1-CT-2000-00058). European Commission Project MUSIC.
- Mulsandi, A., Mamenun, M., Fitriano, L., & Hidayat, R. (2019). Perbaikan estimasi curah hujan berbasis data satelit dengan memperhitungkan faktor

- pertumbuhan awan. *Jurnal Sains dan Teknologi Modifikasi Cuaca*, 20(2), 67–78.
- Pratama, A., Agiel, H. M., & Oktaviana, A. A. (2022). Evaluasi satellite precipitation product (GSMaP, CHIRPS, dan IMERG) di Kabupaten Lampung Selatan. *Journal of Science and Applicative Technology*, 6(1), 32–40.
- Radová, M., & Seidl, J. (2008). Parallax applications when comparing radar and satellite data. In *The 2008 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*.
- Roy Bhowmik, S. K., & Das, A. K. (2007). Rainfall analysis for Indian monsoon region using the merged rain gauge observations and satellite estimates: Evaluation of monsoon rainfall features. *Journal of Earth System Science*, 116(3), 187–198.
- Silalahi, F. S. A., Farda, N. M., & Nurjani, E. (2024). Uji perbandingan metode estimasi curah hujan menggunakan Satelit Himawari: Metode konvensional dan machine learning. *Jurnal Geosains dan Remote Sensing*, 5(2), 131–141.
- Sujarweni, V. W. (2014). *Metodologi penelitian*. Yogyakarta: Pustaka Baru Press.
- Upadhyaya, S., & Ramsankaran, R. A. A. J. (2016). Modified-INSAT multi-spectral rainfall algorithm (M-IMSRA) at climate region scale: Development and validation. *Remote Sensing of Environment*, 187, 186–201.
- Vijayalakshmi, S. (2023). IMSRA rainfall estimation validation and variability over Indian region during GAJA cyclone. *Mausam*, 74(1), 129–140.
- Wilks, D. S. (2006). *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Academic Press.
- Zakir, A. W., Sulistya, & Khotimah, M. K. (2010). *Perspektif operasional cuaca tropis*. Jakarta: Pusat Penelitian dan Pengembangan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG).