

EVALUASI AKURASI PRODUK CURAH HUJAN SATELIT GPM IMERG, GSMAP, PERSIANN-CCS, DAN HIMAWARI-9 DI MALANG RAYA

Muhammad Nur Rizqi¹, Aditya Mulya²

^{1,2,3,4}Program Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG); Jl. Meteorologi No. 5, RT.003/RW.013, Tanah Tinggi, Kec. Tangerang, Kota Tangerang, Banten 15221, Indonesia.

Keywords:

GSMaP, GPM IMERG, Himawari-9, PERSIANN, Satelit

Correspondent Email:

muhammadnurizqi2004@gmail.com

Abstrak. Data curah hujan yang akurat sangat krusial untuk mitigasi bencana hidrometeorologi, khususnya di wilayah topografi kompleks seperti Malang Raya. Produk satelit (SPPs) menjadi alternatif observasi permukaan, namun akurasi bervariasi bergantung pada algoritma dan orografi lokal. Penelitian ini mengevaluasi performa empat produk satelit (GPM IMERG, GSMaP, PERSIANN-CCS, dan Himawari-9) terhadap observasi stasiun hujan otomatis (ARG) pada skala per jam, harian, dan dasarian selama 2023–2025. Evaluasi spasial dan kuantitatif dilakukan menggunakan metrik kontinu dan kategorial. Hasilnya mengonfirmasi efek *temporal smoothing*, di mana akurasi seluruh produk meningkat seiring bertambahnya periode akumulasi. GPM IMERG konsisten menunjukkan performa terbaik di seluruh skala (*Critical Success Index*/CSI harian = 0,514; dasarian = 0,771) dengan ketahanan spasial tertinggi. Sebaliknya, GSMaP gagal menangkap presipitasi pada resolusi tinggi. Himawari-9 memiliki kemampuan deteksi kejadian hujan tertinggi (*Probability of Detection*/POD dasarian = 0,869), namun mengalami *overestimation* masif (*Relative Bias* > 600%) akibat misinterpretasi awan orografis. Kesimpulannya, IMERG merupakan produk paling andal yang direkomendasikan untuk sistem peringatan dini bencana dan aplikasi hidrologi di Malang Raya.



Copyright © 2026 The Author(s), Published by Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

Abstract. Accurate precipitation data is crucial for hydrometeorological disaster mitigation, particularly in regions with complex topography like Malang Raya. Satellite Precipitation Products (SPPs) provide alternative surface observations, yet their accuracy varies depending on algorithms and local orography. This study evaluates the performance of four SPPs (GPM IMERG, GSMaP, PERSIANN-CCS, and Himawari-9) against Automatic Rain Gauge (ARG) observations at hourly, daily, and dekadal scales from 2023 to 2025. Spatial and quantitative evaluations were conducted using continuous and categorical metrics. The results confirmed a temporal smoothing effect, where the accuracy of all products improved with longer accumulation periods. GPM IMERG consistently demonstrated the best performance across all scales (daily Critical Success Index/CSI = 0.514; dekadal = 0.771) with the highest spatial robustness. Conversely, GSMaP failed to capture precipitation at high resolutions. Himawari-9 possessed the highest rainfall detection capability (dekadal Probability of Detection/POD = 0.869) but suffered from massive overestimation (Relative Bias > 600%) due to the misinterpretation of orographic clouds. In conclusion, IMERG is the most reliable product recommended for disaster early warning systems and hydrological applications in Malang Raya.

1. PENDAHULUAN

Ketersediaan data curah hujan yang akurat, baik secara spasial maupun temporal, merupakan kebutuhan fundamental dalam berbagai bidang terapan seperti klimatologi, hidrologi, pertanian, dan mitigasi bencana hidrometeorologi [1], [2]. Di Indonesia, data curah hujan menjadi basis utama dalam sistem peringatan dini bencana banjir, tanah longsor, dan kekeringan yang dikeluarkan oleh Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) [3]. Instrumen utama dalam pengukuran curah hujan adalah penakar hujan (rain gauge), yang melakukan pengamatan langsung di permukaan dan menghasilkan data dengan akurasi tinggi pada titik pengamatan [4]. Namun demikian, persebaran jaringan penakar hujan di Indonesia masih belum merata, terutama di wilayah terpencil dan pegunungan, sehingga representasi spasial data curah hujan menjadi kurang memadai [5].

Seiring perkembangan teknologi penginderaan jauh, produk estimasi curah hujan satelit (Satellite Precipitation Products/SPPs) kini menjadi alternatif penting untuk melengkapi keterbatasan pengamatan konvensional [6]. Beberapa produk SPPs yang banyak digunakan secara global antara lain Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) [7], Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) [8], Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks – Cloud Classification System (PERSIANN-CCS) [9], serta estimasi curah hujan berbasis satelit geostasioner Himawari-9 [10]. Masing-masing produk memiliki perbedaan mendasar dalam hal sensor yang digunakan (passive microwave vs infrared), algoritma retrieval, resolusi spasio-temporal, serta ketersediaan koreksi berbasis rain gauge [11]. Perbedaan karakteristik tersebut menyebabkan tingkat akurasi estimasi presipitasi dapat bervariasi secara signifikan, terutama ketika diterapkan pada wilayah dengan kondisi topografi dan dinamika atmosfer yang kompleks [12].

Berbagai studi evaluasi SPPs telah dilakukan di berbagai belahan dunia. Ji et al. [13] mengevaluasi lima produk SPPs di DAS Yarlung Zangbo, Tiongkok, dan menemukan bahwa GPM-IMERG dan CMORPH memberikan simulasi aliran terbaik dengan $NSE \approx 0,82$ – $0,86$, sementara PERSIANN-CDR

menunjukkan bias tertinggi. Di benua Afrika, Thiemi et al. [14] mengevaluasi TMPA, PERSIANN-CDR, dan CMORPH terhadap referensi GPCP-1dd serta menegaskan pentingnya koreksi bias agar produk satelit real-time lebih konsisten untuk pemantauan hidrologi. Prasetya et al. [15] mengevaluasi GSMaP, IMERG, dan CHIRPS di Pulau Bali menggunakan metrik volumetrik (VHI, VFAR, VCSI) dan menemukan bahwa IMERG unggul pada skala harian dan musiman, sedangkan seluruh produk mengalami kesulitan mendeteksi curah hujan harian akibat topografi kompleks. Di Jawa Tengah, Satrio et al. [16] menunjukkan bahwa GPM memiliki korelasi tertinggi pada skala bulanan ($r \approx 0,92$) dan performa terbaik pada skala harian dengan time lag +1 hari. Sementara itu, Suryanto et al. [17] menemukan bahwa CHIRPS di Kalimantan Barat memiliki korelasi lemah ($r \approx 0,25$) namun cukup andal dalam mendeteksi kejadian hujan ($POD \approx 0,72$). Studi-studi tersebut menunjukkan bahwa performa SPPs sangat bergantung pada karakteristik regional, skala temporal analisis, serta jenis sensor dan algoritma yang digunakan [18].

Meskipun demikian, studi yang membandingkan keempat produk SPPs secara simultan — IMERG, GSMaP, PERSIANN-CCS, dan Himawari-9 — pada region mikro dengan topografi heterogen di Indonesia masih sangat terbatas. Khususnya, evaluasi Himawari-9 sebagai produk estimasi curah hujan berbasis satelit geostasioner infrared jarang dilakukan di Indonesia. Wilayah Malang Raya (meliputi Kota Malang, Kabupaten Malang, dan Kota Batu) dipilih sebagai lokasi penelitian karena memiliki karakteristik topografi yang sangat beragam dalam radius yang relatif kecil, mulai dari pesisir selatan (0–50 m dpl), dataran tengah (400–600 m dpl), hingga kawasan pegunungan di utara dan barat (>1000 m dpl) [19]. Variasi topografi ini menyebabkan distribusi curah hujan yang sangat heterogen dan berpengaruh langsung terhadap kejadian bencana hidrometeorologi. Pada periode 2023–2025, BNPB mencatat bahwa Kabupaten Malang merupakan salah satu kabupaten dengan frekuensi bencana banjir bandang dan tanah longsor tertinggi di Jawa Timur, terutama di wilayah hulu DAS Brantas dan lereng selatan Gunung Arjuno–Welirang [20]. Kondisi ini menegaskan urgensi ketersediaan data curah

hujan yang akurat dan andal di wilayah tersebut, baik untuk keperluan analisis hidroklimatologi maupun peningkatan kapasitas sistem peringatan dini bencana.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengevaluasi akurasi estimasi curah hujan empat produk satelit, yaitu GPM IMERG, GSMaP, PERSIANN-CCS, dan Himawari-9, terhadap data observasi Automatic Rain Gauge (ARG) di wilayah Malang Raya pada tiga skala temporal (per jam, harian, dan dasarian); dan (2) menganalisis variabilitas akurasi spasial antar stasiun serta karakteristik bias berdasarkan kelas intensitas curah hujan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan ilmiah dalam pemilihan produk SPPs yang paling sesuai untuk aplikasi operasional hidrometeorologi di wilayah topografi kompleks Indonesia.

2. TINJAUAN PUSTAKA

GPM IMERG merupakan produk utama dari misi Global Precipitation Measurement (GPM) yang dikembangkan NASA dan JAXA. IMERG mengintegrasikan estimasi Passive Microwave (PMW) dari konstelasi satelit GPM dengan data Infrared (IR) dari satelit geostasioner melalui algoritma morphing dan kalibrasi rain gauge bulanan. Versi Final Run dianggap paling akurat karena telah melalui koreksi bias [7].

GSMaP dikembangkan oleh JAXA dengan keunggulan penerapan algoritma Kalman Filter untuk memperkirakan pergerakan dan evolusi sistem curah hujan di antara dua waktu pengamatan sensor PMW. Versi Gauge-adjusted menggunakan data rain gauge dari Climate Prediction Center (CPC) untuk koreksi bias [8].

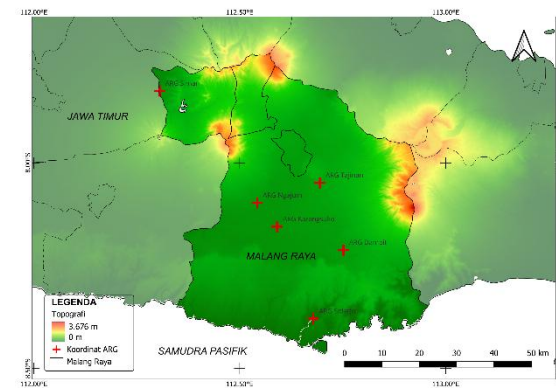
PERSIANN-CCS dikembangkan oleh CHRS, University of California, Irvine. Berbeda dengan produk berbasis PMW, PERSIANN-CCS mengadopsi pendekatan klasifikasi awan (cloud patch-based algorithm) yang melakukan segmentasi citra IR berdasarkan ambang batas suhu puncak awan, kemudian mengaitkan fitur awan dengan intensitas curah hujan melalui Self-Organizing Feature Map (SOFM) [9].

Himawari-9 merupakan satelit geostasioner milik JMA yang dilengkapi instrumen Advanced Himawari Imager (AHI). Himawari-9 tidak secara langsung menyediakan estimasi curah hujan, sehingga dalam penelitian ini digunakan metode Auto Estimator (AE) yang

mengkonversi suhu puncak awan (brightness temperature) kanal 13 IR menjadi estimasi intensitas curah hujan melalui hubungan empiris eksponensial [10], [21].

3. METODE PENELITIAN

3.1. Lokasi dan Data Penelitian



Penelitian ini dilaksanakan di wilayah Malang Raya, Provinsi Jawa Timur, yang secara geografis terletak pada koordinat $7,7^{\circ}$ – $8,5^{\circ}$ LS dan $112,1^{\circ}$ – $113,0^{\circ}$ BT. Wilayah ini memiliki variasi topografi yang sangat beragam, mulai dari pesisir selatan Samudera Hindia, dataran tengah di sekitar Kota Malang, hingga kawasan pegunungan dengan puncak tertinggi Gunung Semeru (3.676 m dpl) dan Gunung Arjuno (3.339 m dpl) di bagian utara dan barat [19]. Secara klimatologis, Malang Raya dipengaruhi oleh sistem iklim monsunial dengan perbedaan yang jelas antara musim hujan (Oktober–Maret) dan musim kemarau (April–September) [25].

Data observasi curah hujan diperoleh dari enam Automatic Rain Gauge (ARG) milik BMKG yang tersebar di wilayah Malang Raya, sebagaimana disajikan pada Tabel 2. Keenam stasiun dipilih berdasarkan ketersediaan data kontinu selama periode Januari 2023 hingga Desember 2025, serta representativitas terhadap variasi topografi wilayah studi.

Tabel 1. Daftar stasiun ARG yang digunakan dalam penelitian

No.	ID Stasiun	Nama Stasiun
1	150038	ARG Sitiarjo
2	150043	ARG Siman
3	150314	ARG Karangsuko
4	150316	ARG Tajinan
5	STA0063	ARG Ngajum
6	STA0265	ARG Dampit

1. Data ARG memiliki resolusi temporal 10 Center BMKG (<https://awscenter.bmkg.go.id>).
2. IMERG V7 Final Run dari NASA (<https://gpm.nasa.gov/data/imerg>)
3. GSMaP V8 Gauge dari JAXA (<https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/>),
4. PERSIANN-CCS dari CHRS-UCI (<https://chrsdata.eng.uci.edu/>),
5. Data *brightness temperature* kanal 13 Himawari-9 dari server FTP BMKG (<ftp://satelit.bmkg.go.id>).

Seluruh data mencakup periode Januari 2023 hingga Desember 2025 (3 tahun).

3.2. Pra Pengolahan Data

Pra-pengolahan data dilakukan melalui lima tahap berurutan untuk memastikan kesetaraan kualitas, resolusi temporal, dan periode analisis antar seluruh sumber data.

Tahap pertama, kontrol kualitas data ARG dilakukan berdasarkan kode kualitas (quality flag) sesuai standar WMO dan BMKG [3]. Data dengan flag 9 (missing/NaN) dihapus dari dataset, sedangkan data suspect (flag 1) dipertahankan dengan pertimbangan bahwa penghapusan langsung berpotensi menghilangkan kejadian hujan riil pada intensitas ekstrem.

Tahap kedua, kontrol kualitas umum diterapkan pada seluruh sumber data: nilai negatif dikonversi menjadi NaN, dan nilai ekstrem yang melebihi 150 mm/jam dikonversi menjadi NaN berdasarkan batas fisik curah hujan tropis [26].

Tahap ketiga, data Himawari-9 berupa *brightness temperature* (BT) kanal 13 IR dikonversi menjadi estimasi curah hujan menggunakan metode Auto Estimator (AE) [21]. Metode ini mengestimasi intensitas curah hujan berdasarkan hubungan empiris eksponensial antara suhu puncak awan dan laju hujan, di mana semakin rendah BT, semakin tinggi potensi intensitas hujan.

Tahap keempat, seluruh data diagregasi ke skala per jam sebagai basis temporal utama. Data ARG dan Himawari-9 (resolusi asli 10 menit) diagregasi dengan menjumlahkan enam nilai per jam, data IMERG (resolusi 30 menit) diagregasi dengan menjumlahkan dua nilai per jam, sedangkan data GSMaP dan PERSIANN-CCS yang sudah memiliki resolusi per jam digunakan langsung.

Tahap kelima, dilakukan ekstraksi data grid satelit ke lokasi titik stasiun ARG menggunakan metode nearest neighbour [22]. Seluruh sumber data digabungkan (merge) berdasarkan timestamp UTC, kemudian diterapkan listwise deletion — yaitu penghapusan seluruh baris data apabila salah satu dari lima sumber memiliki nilai NaN. Pendekatan ini didasarkan pada prinsip bahwa data hilang tidak dapat diasumsikan sebagai curah hujan nol (missing $\neq$ zero rain) [15], [27]. Dari proses ini diperoleh total 138.856 pasangan data per jam yang valid. Selanjutnya, data per jam diagregasi ke skala harian (24 jam, menghasilkan 5.910 data) dan skala dasarian mengikuti standar BMKG: Dasarian I (tanggal 1–10), Dasarian II (tanggal 11–20), Dasarian III (tanggal 21–akhir bulan), menghasilkan 592 data [3].

3.3. Pra Pengolahan Data

Evaluasi akurasi dilakukan menggunakan metrik kontinu dan metrik kategorikal pada tiga skala temporal (per jam, harian, dan dasarian) untuk setiap kombinasi stasiun dan produk satelit.

Metrik kontinu yang digunakan meliputi:

Koefisien korelasi Pearson (r), yang mengukur kekuatan hubungan linier antara estimasi satelit S_i , dan observasi ARG O_i , dengan nilai ideal 1:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}}$$

Relative Bias (RB), yang mengukur kecenderungan sistematis estimasi satelit terhadap observasi dalam persentase, dengan nilai ideal 0%:

$$RB = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} \times 100\%$$

Mean Error (ME), yang mengukur rata-rata selisih antara estimasi satelit dan observasi ARG dengan mempertahankan tanda (*signed*). Nilai positif menunjukkan *overestimation*, sedangkan nilai negatif menunjukkan *underestimation*, dengan nilai ideal 0 mm:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)$$

Root Mean Square Error (RMSE), yang mengukur magnitude error dengan penekanan pada kesalahan besar, dengan nilai ideal 0 mm:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}$$

Di mana S_i adalah nilai estimasi satelit, O_i adalah nilai observasi ARG, $\bar{S}$ dan $\bar{O}$ masing-masing adalah nilai rata-rata, dan N adalah jumlah pasangan data.

Metrik kategorikal dihitung berdasarkan tabel kontingensi 2×2 yang mengklasifikasikan setiap pasangan observasi menjadi *Hit* (H), *Miss* (M), *False Alarm* (F), dan *Correct Negative* (CN) berdasarkan ambang batas curah hujan (T) seperti pada tabel 2.

Tabel 2. Kontingensi 2×2 untuk Evaluasi Kategorikal

	ARG $\geq T$ (Hujan)	ARG $< T$ (Tidak Hujan)
Satelit $\geq T$ (Hujan)	<i>Hit</i> (H)	<i>False Alarm</i> (F)
Satelit $< T$ (Tidak Hujan)	<i>Miss</i> (M)	<i>Correct Negative</i> (CN)

Ambang batas yang digunakan mengacu pada [23]: $T = 0,1$ mm/jam untuk skala per jam dan $T = 1,0$ mm/hari untuk skala harian.

Probability of Detection (POD), mengukur proporsi kejadian hujan yang berhasil dideteksi satelit (nilai ideal = 1):

$$POD = \frac{H}{H + M}$$

False Alarm Ratio (FAR), mengukur proporsi estimasi hujan yang merupakan alarm palsu (nilai ideal = 0):

$$FAR = \frac{F}{H + F}$$

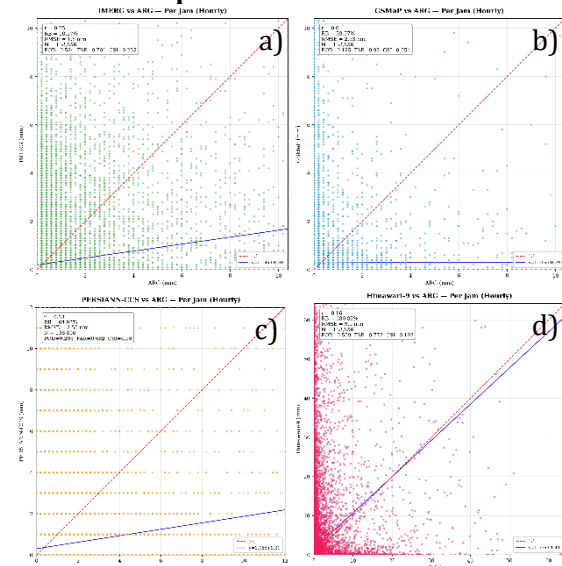
Critical Success Index (CSI), memberikan evaluasi keseluruhan dengan

mempertimbangkan *hit*, *miss*, dan *false alarm* secara simultan (nilai ideal = 1):

$$CSI = \frac{H}{H + M + F}$$

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Evaluasi pada Skala Per Jam



Gambar.2 Scatter Plot antara observasi ARG dan estimasi produk satelit (IMERG, GSMaP, PERSIANN-CCS, dan Himawari-9) pada skala per jam di Malang Raya

Gambar 2 menyajikan *scatter plot* keempat produk pada skala per jam dengan total 138.856 pasangan data valid dari enam stasiun ARG selama periode Januari 2023–Desember 2025. Jawa Timur selama periode penelitian pada skala per jam.

Pada gambar 2(a), sebaran data IMERG menunjukkan kecenderungan mengikuti pola linier positif meskipun dengan dispersi yang cukup besar. Garis regresi ($y = 0,14x + 0,20$) memiliki kemiringan yang jauh di bawah garis 1:1, mengindikasikan *underestimation* sistematis terhadap intensitas curah hujan. Meskipun demikian, IMERG mencatatkan korelasi tertinggi ($r = 0,25$) di antara keempat produk, disertai *Relative Bias* (RB) terendah sebesar 10,57% dan $RMSE = 1,8$ mm. Dari aspek deteksi kejadian hujan, IMERG memperoleh $POD = 0,524$, $FAR = 0,701$, dan $CSI = 0,235$ — kombinasi terbaik pada skala ini [7], [29].

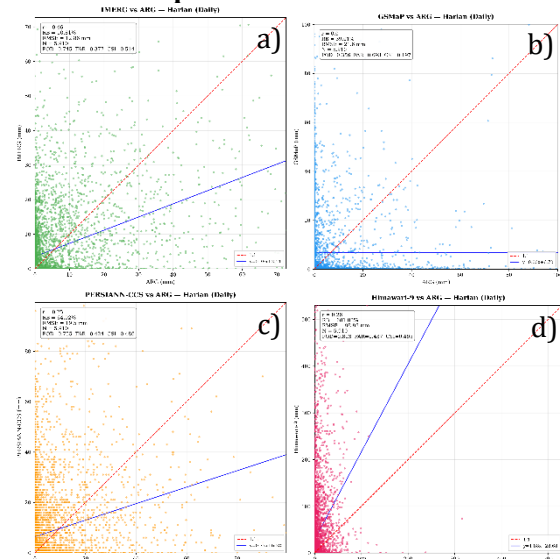
Gambar 2(b) GSMaP menunjukkan pola yang sangat berbeda. Garis regresi yang praktis mendatar ($y = 0,00x + 0,29$) dan korelasi nihil ($r = 0,0$) mengonfirmasi bahwa estimasi GSMaP tidak memiliki hubungan linier

bermakna dengan observasi ARG pada resolusi temporal tinggi. POD yang sangat rendah (0,125) menunjukkan bahwa GSMaP hanya mendeteksi sekitar 12,5% kejadian hujan yang terekam ARG, sementara $FAR = 0,92$ mengindikasikan bahwa 92% estimasi hujan merupakan *false alarm*, menghasilkan CSI yang sangat rendah (0,051). Meskipun RB (38,97%) dan RMSE (2,33 mm) lebih moderat dibandingkan Himawari-9, kegagalan fundamental dalam deteksi kejadian menjadikan GSMaP produk dengan performa terburuk pada skala per jam. Pola ini konsisten dengan Liu *et al.* [24] yang mengidentifikasi keterbatasan produk berbasis *passive microwave* (PMW) pada orbit LEO dalam menangkap variabilitas curah hujan sub-harian akibat cakupan *sampling* yang tidak kontinu.

Pada gambar 2(c) memperlihatkan distribusi data PERSIANN-CCS yang unik — titik-titik membentuk pola *grid* diskret karena resolusi integer produk ini. Korelasi moderat ($r = 0,13$) dengan garis regresi ($y = 0,16x + 0,31$) menunjukkan respons lemah terhadap variasi intensitas. RB sebesar 64,92% mengindikasikan *overestimation*, namun FAR yang relatif lebih rendah (0,682) dibandingkan GSMaP menjadikan PERSIANN-CCS lebih andal dalam aspek *false alarm*. $CSI = 0,18$ menempatkan produk ini pada posisi menengah [9], [32].

Pada gambar 2(d) menampilkan kontras yang mencolok pada data Himawari-9. Sebaran data melebar jauh di atas garis 1:1 dengan rentang estimasi hingga 60 mm/jam, jauh melampaui observasi ARG. Garis regresi ($y = 0,93x + 1,41$) memiliki kemiringan mendekati 1, namun *intercept* positif dan sebaran yang sangat lebar menghasilkan $RB = 680,82\%$ — *overestimation* masif yang merupakan karakteristik fundamental estimasi berbasis *infrared* (IR). Menariknya, Himawari-9 mencatatkan POD tertinggi (0,559) di antara seluruh produk, menunjukkan kemampuan deteksi kejadian hujan yang unggul berkat resolusi temporal tinggi (10 menit) dari orbit geostasioner. Namun, $FAR = 0,773$ dan $RMSE = 9,9$ mm yang sangat besar mengonfirmasi bahwa banyak deteksi tersebut merupakan *false alarm* akibat interpretasi keliru awan tebal non-presipitasi sebagai awan penghasil hujan [10], [30].

4.2 Evaluasi pada Skala Harian



Gambar.3 Scatter Plot antara observasi ARG dan estimasi produk satelit (IMERG, GSMaP, PERSIANN-CCS, dan Himawari-9) pada skala harian di Malang Raya

Gambar 3 menyajikan *scatter plot* pada skala harian (5.910 pasangan data), yang menunjukkan perbaikan performa signifikan pada seluruh produk sebagai hasil agregasi temporal. Pada gambar 3(a), sebaran data IMERG mengerucut lebih dekat ke garis 1:1 dibandingkan skala per jam. Korelasi meningkat hampir dua kali lipat menjadi $r = 0,46$, sementara garis regresi ($y = 0,38x + 3,51$) menunjukkan kemiringan yang lebih mendekati ideal meskipun masih mengindikasikan *underestimation* pada curah hujan tinggi (> 40 mm/hari). RB relatif stabil (10,81%) dan RMSE meningkat menjadi 12,86 mm — peningkatan absolut yang merupakan konsekuensi logis dari akumulasi harian. POD melonjak dari 0,524 menjadi 0,745, FAR turun drastis dari 0,701 menjadi 0,377, dan CSI meningkat lebih dari dua kali lipat menjadi 0,514, mengindikasikan bahwa lebih dari separuh kejadian hujan harian berhasil diestimasi dengan tepat oleh IMERG [7], [29].

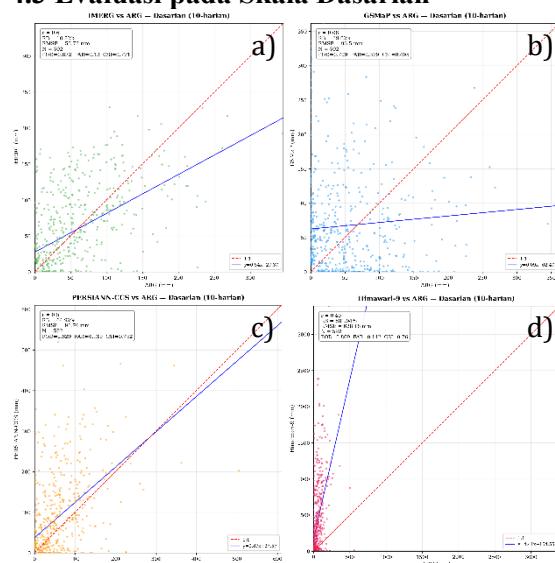
Pada Gambar 3(b) masih menunjukkan garis regresi yang mendatar ($y = 0,00x + 6,70$) dengan korelasi yang tetap nihil ($r = 0,0$), menandakan bahwa agregasi harian belum cukup untuk memperbaiki kegagalan fundamental produk ini di wilayah studi. Meskipun POD meningkat menjadi 0,356 dan FAR turun ke 0,693, CSI hanya mencapai 0,197 — sedikit di bawah ambang batas "dapat

digunakan" (0,2) yang umumnya menjadi acuan praktis [31].

Pada gambar 3(c) data PERSIAN-CCS menunjukkan peningkatan substansial pada skala harian. Korelasi meningkat menjadi $r = 0,25$ dengan garis regresi ($y = 0,33x + 6,38$) yang menunjukkan respons positif terhadap peningkatan curah hujan ARG. $POD = 0,755$ — hampir setara dengan IMERG — dan $FAR = 0,424$ menghasilkan $CSI = 0,486$, menjadikan PERSIANN-CCS produk kedua terbaik secara keseluruhan pada skala harian. Namun, RB yang masih tinggi (64,92%) dan $RMSE = 19,5$ mm menunjukkan bahwa bias sistematis *overestimation* tetap melekat [9], [32].

Temuan paling menarik pada Gambar 3(d) terlihat pada data Himawari-9. Sebaran data sangat melebar pada sumbu vertikal (estimasi mencapai >500 mm/hari) dengan garis regresi yang sangat curam ($y = 1,88x + 28,68$), menegaskan *overestimation* masif (RB = 681,83%; $RMSE = 98,93$ mm). Meskipun demikian, Himawari-9 mencatatkan POD tertinggi pada skala harian (0,803) dan FAR yang mengalami penurunan signifikan dibandingkan skala per jam (0,437 vs 0,773), menghasilkan $CSI = 0,495$ — nyaris setara dengan IMERG (0,514). Hal ini menunjukkan bahwa dalam hal deteksi keberadaan hujan (*rain occurrence*), Himawari-9 justru bersaing dengan produk terbaik, meskipun estimasi kuantitatifnya tidak dapat diandalkan tanpa koreksi bias [10], [30].

4.3 Evaluasi pada Skala Dasarian



Gambar.4 Scatter Plot antara observasi ARG dan estimasi produk satelit (IMERG, GSMaP, PERSIANN-CCS, dan Himawari-9) pada skala dasarian di Malang Raya

Gambar 4 menyajikan *scatter plot* pada skala dasarian (592 pasangan data), di mana efek *temporal smoothing* semakin jelas terlihat

Pada gambar 4(a), sebaran data IMERG mengikuti pola linier yang lebih tegas dengan korelasi meningkat menjadi $r = 0,60$. Garis regresi ($y = 0,54x + 27,37$) menunjukkan kemiringan yang lebih mendekati 1 dibandingkan skala sebelumnya. $POD = 0,872$ dan $FAR = 0,13$ menghasilkan $CSI = 0,771$, yang berarti sekitar 77% kejadian hujan dasarian teridentifikasi dengan benar — pencapaian terbaik di antara seluruh produk dan skala temporal. RB tetap konsisten (10,82%) sementara $RMSE$ meningkat menjadi 53,73 mm akibat akumulasi periodik [7], [29], [31].

Pada Gambar 4(b) GSMaP mulai menunjukkan pola yang lebih bermakna dibandingkan skala per jam dan harian. Korelasi yang semula nihil kini meningkat menjadi $r = 0,08$ — masih sangat lemah namun untuk pertama kalinya positif. Garis regresi ($y = 0,09x + 62,47$) dengan *intercept* yang sangat tinggi (62,47 mm) mengonfirmasi *overestimation* absolut yang konsisten. POD meningkat signifikan menjadi 0,709 dan $CSI = 0,495$, menunjukkan bahwa pada skala dasarian, GSMaP mulai menunjukkan utilitas sebagai indikator *rain occurrence* meskipun estimasi kuantitatifnya tetap tidak akurat ($RMSE = 96,5$ mm) [8], [24].

Pada gambar 4(c) data PERSIAN-CCS pada skala dasarian menunjukkan peningkatan yang impresif. Korelasi meningkat dua kali lipat menjadi $r = 0,50$, dan garis regresi ($y = 0,87x + 37,57$) memiliki kemiringan yang paling mendekati 1 di antara seluruh produk — mengindikasikan bahwa pada akumulasi dasarian, PERSIANN-CCS mampu merespons variabilitas curah hujan dengan proporsi yang mendekati realitas. $POD = 0,829$ dan $FAR = 0,139$ menghasilkan $CSI = 0,732$, menjadikan PERSIANN-CCS produk dengan peningkatan performa terbesar lintas skala temporal [9], [32].

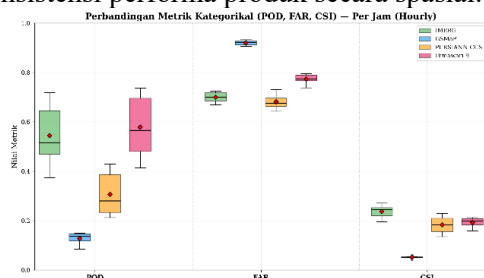
Pada Gambar 4 Himawari-9 menampilkan distribusi yang secara visual sangat berbeda dari produk lain: titik-titik data terkonsentrasi pada sudut kiri bawah dengan estimasi yang

mencapai >3.000 mm per dasarian, sementara observasi ARG jarang melebihi 350 mm. Garis regresi ($y = 4,41x + 164,55$) dengan kemiringan 4,41 mengonfirmasi bahwa estimasi Himawari-9 rata-rata 4,4 kali lebih besar dari observasi. Korelasi meningkat menjadi $r = 0,49$, yang mengejutkan karena hampir menyamai PERSIANN-CCS ($r = 0,50$), menunjukkan bahwa pola temporal curah hujan tertangkap dengan cukup baik meskipun besarnya sangat overestimasi. $POD = 0,869$ dan $FAR = 0,142$ menghasilkan $CSI = 0,76$, yang merupakan capaian tertinggi kedua setelah IMERG. Temuan ini menegaskan potensi Himawari-9 sebagai pendeteksi kejadian hujan yang unggul, namun memerlukan koreksi bias substansial sebelum dapat digunakan untuk estimasi kuantitatif [10], [21], [30].

Secara keseluruhan, perbandingan lintas tiga skala temporal mengonfirmasi bahwa efek *temporal smoothing* berlaku secara universal: korelasi seluruh produk meningkat seiring bertambahnya periode akumulasi. Namun, laju peningkatan tidak seragam — IMERG, dengan fondasi algoritmik yang paling kuat (kombinasi PMW + IR + kalibrasi *gauge*), menunjukkan performa terbaik di seluruh skala, sementara GSMaP memerlukan periode akumulasi dasarian untuk mulai menunjukkan utilitas yang bermakna [7], [29], [31].

4.4 Evaluasi Kemampuan Deteksi Kejadian Hujan

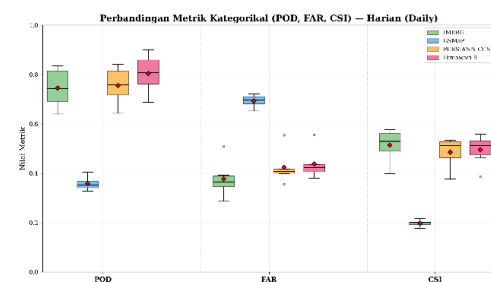
Gambar 5 menyajikan *boxplot* perbandingan metrik kategorikal (POD, FAR, CSI) dari keenam stasiun pada tiga skala temporal: per jam, harian, dan dasarian. Visualisasi ini menampilkan variabilitas antar-stasiun untuk setiap metrik sehingga memungkinkan evaluasi konsistensi performa produk secara spasial.



Gambar 5. Boxplot metrik evaluasi (POD, FAR, CSI) produk estimasi IMERG, GSMaP, PERSIANN-CCS, dan Himawari-9 pada skala per jam.

Pada skala per jam (Gambar 5), perbedaan performa deteksi antar-produk sangat jelas.

IMERG dan Himawari-9 mendominasi metrik POD dengan median masing-masing $\approx 0,52$ dan $\approx 0,56$, sementara GSMaP tertinggal jauh dengan median POD $\approx 0,13$ dan sebaran interkuartil (IQR) yang sangat sempit — menandakan kegagalan deteksi yang konsisten di seluruh stasiun. PERSIANN-CCS menempati posisi menengah dengan median POD $\approx 0,28$ dan IQR yang relatif lebar (0,22–0,38), mengindikasikan variabilitas performa antar-stasiun yang lebih besar. Pada metrik FAR, GSMaP mencatatkan nilai tertinggi (median $\approx 0,91$) yang mengonfirmasi dominasi *false alarm*, diikuti Himawari-9 ($\approx 0,77$), IMERG ($\approx 0,70$), dan PERSIANN-CCS ($\approx 0,68$). CSI pada skala per jam masih sangat rendah untuk seluruh produk — IMERG memimpin dengan median $\approx 0,24$, sementara GSMaP hanya mencapai $\approx 0,05$ [24], [29].



Gambar 6. Boxplot metrik evaluasi (POD, FAR, CSI) produk estimasi IMERG, GSMaP, PERSIANN-CCS, dan Himawari-9 pada skala harian.

Pada skala harian (Gambar 6), terjadi konvergensi performa yang signifikan pada metrik POD. Seluruh produk kecuali GSMaP menunjukkan median POD pada rentang 0,75–0,81, dengan Himawari-9 memimpin ($\approx 0,81$). GSMaP meningkat menjadi $\approx 0,36$ namun tetap tertinggal jauh. FAR menurun secara drastis pada seluruh produk — IMERG mencapai median terendah ($\approx 0,37$), diikuti PERSIANN-CCS dan Himawari-9 yang hampir setara ($\approx 0,42$ – $0,43$), sedangkan GSMaP juga mengalami penurunan menjadi $\approx 0,42$. Perbaikan simultan POD dan FAR menghasilkan CSI yang jauh lebih tinggi: IMERG memimpin dengan median $\approx 0,52$, sementara PERSIANN-CCS ($\approx 0,49$) dan Himawari-9 ($\approx 0,50$) nyaris setara. GSMaP tetap konsisten pada posisi terendah (median CSI $\approx 0,20$). Pola IQR pada boxplot harian menunjukkan bahwa IMERG memiliki variabilitas antar-stasiun yang paling rendah

pada CSI, mengindikasikan konsistensi performa spasial yang unggul [7], [31].

Temuan kunci dari analisis boxplot adalah transformasi performa Himawari-9 dari skala per jam ke skala harian. Pada skala per jam, produk ini berada pada posisi menengah-bawah ($CSI \approx 0,19$), namun pada skala harian, CSI-nya melonjak menjadi $\approx 0,50$ — peningkatan lebih dari dua kali lipat yang menunjukkan bahwa kemampuan deteksi Himawari-9 sangat sensitif terhadap periode akumulasi temporal. Pola ini berbeda dengan IMERG yang sudah menunjukkan performa relatif baik sejak skala per jam ($CSI \approx 0,24$) dan meningkat secara lebih moderat pada skala harian ($CSI \approx 0,52$), mengindikasikan bahwa keunggulan IMERG bersumber dari akurasi deteksi intrinsik, bukan semata efek agregasi. GSMaP, sebaliknya, tetap berada pada posisi terendah di kedua skala ($CSI \approx 0,05$ pada skala jam dan $\approx 0,20$ pada skala harian), mengonfirmasi bahwa keterbatasan deteksinya bersifat sistematis dan tidak sepenuhnya teratasi oleh agregasi harian. Selain itu, IQR yang cenderung menyempit pada skala harian dibandingkan skala per jam untuk sebagian besar produk menunjukkan bahwa variabilitas antar-stasiun turut berkurang seiring peningkatan periode akumulasi, mengindikasikan bahwa ketidakpastian spasial estimasi satelit dapat direduksi melalui penggunaan skala temporal yang lebih agregat, meskipun besarnya reduksi ini bervariasi antar-produk [7], [24], [29], [31].

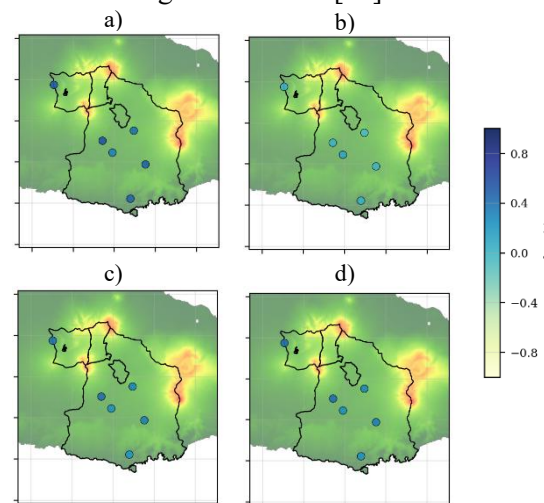
4.5 Evaluasi Akurasi Data Curah Hujan Satelit secara Spasial

A. Analisis Metrik Kontinu

Evaluasi spasial dilakukan untuk mengidentifikasi variasi akurasi estimasi curah hujan satelit di berbagai stasiun ARG yang tersebar di wilayah Malang Raya. Analisis ini menggunakan empat metrik kontinu utama: Korelasi Pearson (r), Relative Bias (RB), Mean Error (ME), dan Root Mean Square Error (RMSE), yang direpresentasikan melalui peta sebaran spasial pada Gambar 7 hingga Gambar 10.

Gambar 7 menunjukkan sebaran spasial metrik Korelasi Pearson untuk keempat produk satelit. Produk IMERG (Gambar 7a) menunjukkan konsistensi korelasi positif yang paling kuat di seluruh stasiun, ditandai dengan dominasi titik berwarna biru gelap, terutama pada stasiun-stasiun di wilayah tengah dan

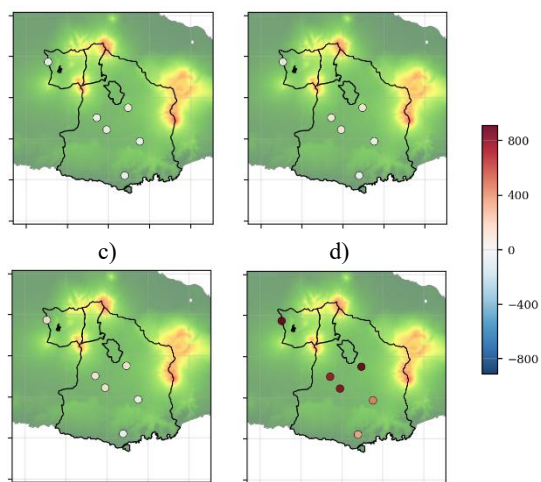
timur Malang Raya. Hal ini menunjukkan bahwa IMERG mampu merekam pola temporal curah hujan dengan sangat baik secara merata [29]. Sebaliknya, GSMaP (Gambar 7b), PERSIANN-CCS (Gambar 7c), dan Himawari-9 (Gambar 7d) menunjukkan tingkat korelasi yang lebih moderat (warna biru muda hingga *cyan*). Secara spasial, seluruh produk umumnya menunjukkan korelasi yang sedikit lebih rendah pada stasiun-stasiun di wilayah barat laut yang memiliki elevasi lebih tinggi, mengindikasikan bahwa kompleksitas topografi menyulitkan penangkapan presipitasi secara akurat oleh algoritma satelit [18].



Gambar 7. Sebaran spasial metrik evaluasi korelasi pearson (r) produk IMERG (a), GSMaP (b), PERSIANN-CCS (c), dan Himawari-9 (d) di Provinsi Jawa Timur.

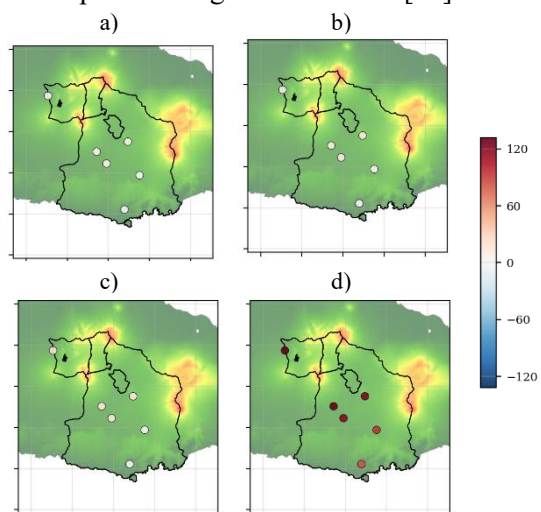
Pola galat sistematis direpresentasikan oleh metrik *Relative Bias* pada Gambar 8. IMERG, GSMaP, dan PERSIANN-CCS menunjukkan RB yang relatif rendah dan mendekati nol secara spasial (titik berwarna putih atau merah muda pucat), menunjukkan estimasi volume curah hujan yang cukup proporsional terhadap observasi permukaan. Sebaliknya, Himawari-9 menampilkan *overestimation* masif secara merata di seluruh stasiun (titik berwarna merah pekat), terutama pada stasiun paling barat. Hal ini menegaskan kelemahan mendasar dari algoritma estimasi berbasis suhu puncak awan (inframerah), yang kerap menginterpretasikan puncak awan dingin non-presipitasi sebagai hujan lebat yang signifikan [30].

a) b)



Gambar 8. Sebaran spasial metrik evaluasi *Relative Bias* IMERG (a), GSMaP (b), PERSIANN-CCS (c), dan Himawari-9 (d) di Provinsi Jawa Timur.

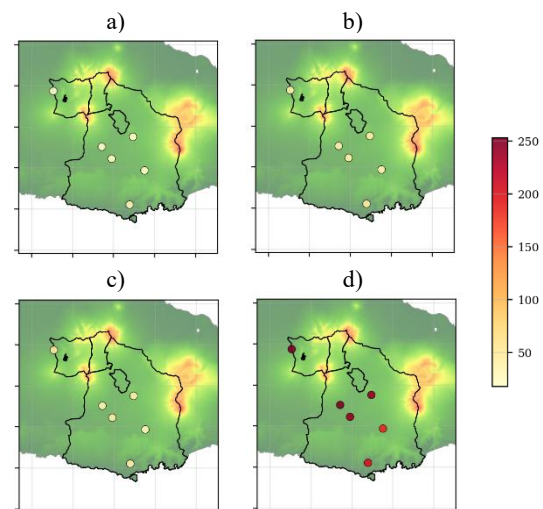
Gambar 9 menampilkan sebaran *Mean Error*, yang memberikan gambaran absolut dari bias yang terjadi. Sejalan dengan hasil metrik RB, IMERG, GSMaP, dan PERSIANN-CCS menunjukkan ME yang sangat kecil (warna pucat/putih). Namun, Himawari-9 kembali menunjukkan galat positif yang ekstrem secara absolut, dengan sebagian besar titik berwarna merah gelap (rata-rata kesalahan positif sangat tinggi). Kegagalan Himawari-9 dalam mengestimasi presipitasi secara kuantitatif tampak sangat parah pada stasiun yang berdekatan dengan zona elevasi pegunungan, mengonfirmasi sensitivitas berlebih produk IR terhadap awan orografis konvektif [12].



Gambar 9. Sebaran spasial metrik *Mean Error* IMERG (a), GSMaP (b), PERSIANN-CCS (c), dan Himawari-9 (d) di Provinsi Jawa Timur.

Gambar 10 memvisualisasikan sebaran RMSE yang merepresentasikan besaran galat total. IMERG, GSMaP, dan PERSIANN-CCS memiliki nilai RMSE yang seragam dan lebih rendah di hampir seluruh stasiun (titik kuning terang hingga krem). Hal ini menegaskan ketahanan performa ketiga produk tersebut secara spasial. Di sisi lain, Himawari-9 menunjukkan RMSE tertinggi yang tersebar luas (titik merah pekat). Nilai RMSE yang sangat besar pada Himawari-9 di wilayah dataran maupun pegunungan membuktikan bahwa ketidakakuratan kuantitatif produk ini bersifat masif dan sistemik.

Secara keseluruhan, analisis spasial metrik kontinu ini membuktikan bahwa IMERG memiliki performa yang tangguh dan konsisten di berbagai kondisi topografi Malang Raya. Himawari-9 memiliki kemampuan deteksi kejadian hujan yang cukup baik, namun algoritma yang digunakannya memerlukan perbaikan atau skema koreksi bias yang komprehensif jika ingin digunakan untuk estimasi kuantitatif curah hujan [33].

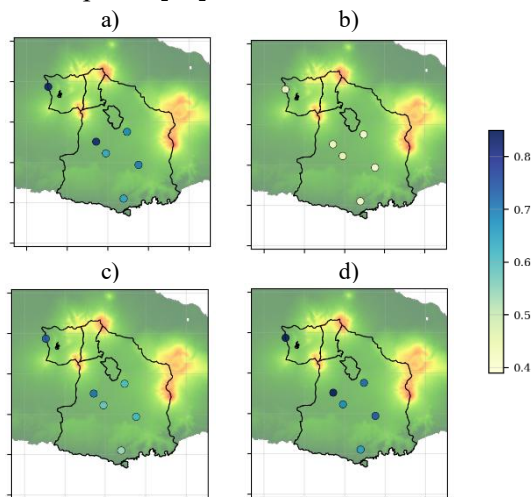


Gambar 10. Sebaran spasial metrik *Root Mean Square Error* IMERG (a), GSMaP (b), PERSIANN-CCS (c), dan Himawari-9 (d) di Provinsi Jawa Timur.

B. Analisis Metrik Kategorial

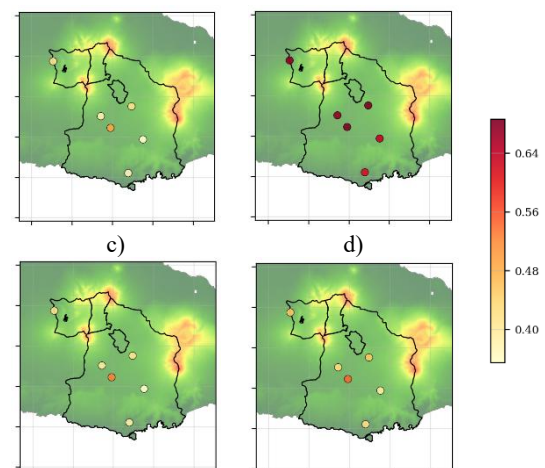
Gambar 11 menyajikan sebaran spasial *Probability of Detection* (POD). Himawari-9 (Gambar 11d) dan IMERG (Gambar 11a) menunjukkan performa deteksi terbaik dengan dominasi titik berwarna biru gelap di hampir seluruh stasiun (POD tinggi). PERSIANN-CCS (Gambar 11c) juga menunjukkan POD yang cukup baik.

Menariknya, stasiun paling barat mencatatkan POD tertinggi secara konsisten untuk ketiga produk tersebut, mengindikasikan bahwa hujan orografis di lereng pegunungan barat cukup mudah terdeteksi. Sebaliknya, GSMaP (Gambar 11b) menunjukkan POD terendah di seluruh wilayah (warna pucat/kuning), menandakan kegagalan deteksi yang merata secara spasial [24].



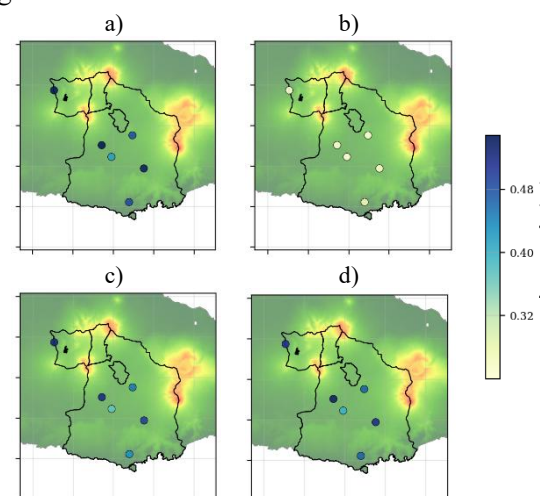
Gambar 11. Sebaran spasial metrik *Probability of Detection* (POD) IMERG (a), GSMaP (b), PERSIANN-CCS (c), dan Himawari-9 (d) di Provinsi Jawa Timur.

Sebaran spasial *False Alarm Ratio* (FAR) pada Gambar 12 menunjukkan tingkat kejadian hujan palsu. Sejalan dengan performa boxplot harian, GSMaP (Gambar 12b) mencatatkan FAR yang sangat tinggi di seluruh wilayah (titik merah pekat). Sebaliknya, IMERG, PERSIANN-CCS, dan Himawari-9 menampilkan FAR yang lebih rendah dan seragam secara spasial (titik kuning-oranye terang). Hal ini mengonfirmasi bahwa ketiga produk tersebut tidak banyak menghasilkan *false alarm* di wilayah Malang Raya, terlepas dari variasi topografi lokalnya.



Gambar 12. Sebaran spasial metrik *False Alarm Ratio* (FAR) IMERG (a), GSMaP (b), PERSIANN-CCS (c), dan Himawari-9 (d) di Provinsi Jawa Timur.

Gambar 13 memvisualisasikan nilai metrik *Critical Success Index* (CSI) yang merupakan representasi komprehensif dari kemampuan deteksi. IMERG (Gambar 13a) dan Himawari-9 (Gambar 13d) menunjukkan CSI tertinggi (biru gelap) secara konsisten di sebagian besar stasiun, membuktikan bahwa kedua produk ini sangat andal dalam mengidentifikasi kejadian hujan secara spasial. PERSIANN-CCS menempati posisi menengah, sedangkan GSMaP kembali menunjukkan performa terburuk di seluruh wilayah Malang Raya. Keceragaman pola spasial pada CSI untuk IMERG dan Himawari-9 membuktikan bahwa keandalan deteksi kejadian hujan dari kedua produk ini tidak banyak terpengaruh oleh gradien elevasi.



Gambar 13. Sebaran spasial metrik *Critical Success Index* (CSI) IMERG (a), GSMaP (b), PERSIANN-CCS (c), dan Himawari-9 (d) di Provinsi Jawa Timur.

Secara keseluruhan, analisis spasial membuktikan bahwa topografi Malang Raya memberikan pengaruh moderat terhadap performa satelit. IMERG merupakan pilihan paling tangguh dan andal untuk pemantauan operasional, sedangkan Himawari-9 memiliki kemampuan deteksi kejadian yang sangat baik namun memerlukan koreksi bias yang komprehensif jika ingin digunakan untuk estimasi kuantitatif presipitasi dalam sistem peringatan dini [33], [34].

5. KESIMPULAN

Berdasarkan evaluasi akurasi empat produk estimasi curah hujan satelit terhadap data ARG di wilayah Malang Raya pada periode Januari 2023–Desember 2025, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. GPM IMERG menunjukkan performa terbaik secara konsisten di seluruh skala temporal dan metrik evaluasi, dengan korelasi meningkat dari $r = 0,25$ (per jam) menjadi 0,46 (harian) dan 0,60 (dasarian), serta CSI tertinggi pada setiap skala (0,235; 0,514; 0,771). IMERG merupakan produk yang paling direkomendasikan untuk aplikasi hidrometeorologi operasional di Malang Raya.
2. Efek *temporal smoothing* meningkatkan akurasi seluruh produk secara signifikan seiring bertambahnya periode akumulasi. Pada skala dasarian, seluruh produk kecuali GSMaP mencapai $CSI > 0,73$ dan $POD > 0,82$, menandakan bahwa pada akumulasi 10-harian, perbedaan performa deteksi antar-produk semakin mengecil.
3. GSMaP menunjukkan kelemahan fundamental pada skala per jam ($r = 0,0$; $CSI = 0,051$) dan harian ($r = 0,0$; $CSI = 0,197$). Baru pada skala dasarian, GSMaP mulai menunjukkan korelasi positif ($r = 0,08$) dan CSI yang mendekati 0,5, mengindikasikan keterbatasan penggunaan produk ini untuk pemantauan curah hujan resolusi tinggi di Malang Raya.
4. Himawari-9 memiliki kapabilitas deteksi kejadian hujan tertinggi (POD harian = 0,803; dasarian = 0,869), namun mengalami *overestimation* kuantitatif masif ($RB \approx 681\%$) pada seluruh skala temporal. Produk ini berpotensi untuk *nowcasting* dan deteksi kejadian hujan, namun tidak dapat diandalkan untuk

estimasi kuantitatif tanpa koreksi bias substansial.

5. Analisis spasial menunjukkan bahwa IMERG memiliki konsistensi performa tertinggi antar-stasiun (CSI harian tertinggi di mayoritas lokasi), sedangkan Himawari-9 dan PERSIANN-CCS lebih sensitif terhadap variasi topografi dan tipe awan lokal. Pemilihan produk satelit untuk aplikasi spesifik perlu mempertimbangkan karakteristik spasial wilayah target.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Buytaert, S. Celleri, P. Willems, B. De Bièvre, and G. Wyseure, "Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes," *J. Hydrol.*, vol. 329, no. 3–4, pp. 413–421, Oct. 2006.
- [2] M. New, M. Todd, M. Hulme, and P. Jones, "Precipitation measurements and trends in the twentieth century," *Int. J. Climatol.*, vol. 21, no. 15, pp. 1889–1922, Dec. 2001.
- [3] BMKG, "Standar Operasional Prosedur Peringatan Dini Cuaca Ekstrem (SOP/025/KB/VIII/2023)," Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jakarta, 2023.
- [4] World Meteorological Organization (WMO), "Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8)," WMO, Geneva, 2018.
- [5] Supari, F. Tangang, L. Juneng, and E. Aldrian, "Observed changes in extreme temperature and precipitation over Indonesia," *Int. J. Climatol.*, vol. 37, no. 4, pp. 1979–1997, Mar. 2017.
- [6] M. G. Gebremichael and F. Hossain, Eds., *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*. Dordrecht: Springer, 2010.
- [7] G. J. Huffman et al., "Integrated Multi-satellitE Retrievals for the Global Precipitation Measurement (GPM) Mission (IMERG)," in *Satellite Precipitation Measurement*, vol. 1, V. Levizzani et al., Eds. Cham: Springer, 2020, pp. 343–353.
- [8] T. Kubota et al., "Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) products in the GPM era," in *Satellite Precipitation Measurement*, vol. 1, V. Levizzani et al., Eds. Cham: Springer, 2020, pp. 355–373.

- [9] Y. Hong, K.-L. Hsu, S. Sorooshian, and X. Gao, "Precipitation estimation from remotely sensed imagery using an artificial neural network cloud classification system," *J. Appl. Meteorol.*, vol. 43, no. 12, pp. 1834–1853, Dec. 2004.
- [10] T. Bessho et al., "An introduction to Himawari-8/9 — Japan's new-generation geostationary meteorological satellites," *J. Meteorol. Soc. Japan*, vol. 94, no. 2, pp. 151–183, 2016.
- [11] H. E. Beck et al., "Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modeling," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 21, no. 12, pp. 6201–6217, Dec. 2017.
- [12] E. I. Nikolopoulos, N. S. Bartsotas, E. N. Anagnostou, and G. Kallos, "Using high-resolution satellite rainfall products to simulate a major flash flood event in northern Italy," *J. Hydrometeorol.*, vol. 16, no. 4, pp. 1843–1860, Aug. 2015.
- [13] H. Ji, K. Peng, and M. Wang, "Evaluation of multiple satellite precipitation products and their potential utilities in the Yarlung Zangbo River Basin," *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, Art. no. 14334, Aug. 2022.
- [14] V. Thiemig, R. Rojas, M. Zambrano-Bigiarini, and A. De Roo, "Hydrological evaluation of satellite-based rainfall estimates over the Volta and Baro-Akobo basins," *J. Hydrol.*, vol. 499, pp. 324–338, Sep. 2013.
- [15] C.-C. Liu, P. E. Aryastana, G.-R. Liu, and W.-R. Huang, "Assessment of satellite precipitation product estimates over Bali Island," *Atmos. Res.*, vol. 244, Art. no. 105032, 2020.
- [16] N. P. Satrio, H. A. Nugroho, and B. S. W. Utomo, "Cross-correlation analysis of satellite precipitation products in the Dengkeng watershed, Central Java," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 930, no. 1, p. 012025, 2021.
- [17] J. Suryanto, Amprin, and Anisum, "Validasi Curah Hujan Harian CHIRPS Precipitation Satellite Product di Provinsi Kalimantan Barat," *J. Ilm. Rekayasa Pertanian Biosistem*, vol. 11, no. 1, pp. 73–88, Mar. 2023.
- [18] Z. Derin et al., "Evaluation of GPM-era global satellite precipitation products over multiple complex terrain regions," *Remote Sens.*, vol. 11, no. 24, Art. no. 2936, Dec. 2019.
- [19] Badan Pusat Statistik Kabupaten Malang, "Kabupaten Malang Dalam Angka 2024," BPS Kabupaten Malang, 2024.
- [20] Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), "Data Informasi Bencana Indonesia (DIBI)," BNPB, Jakarta, 2025. [Online]. Available: <https://dibi.bnpb.go.id>
- [21] G. A. Vicente, R. A. Scofield, and W. P. Menzel, "The operational GOES infrared rainfall estimation technique," *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 79, no. 9, pp. 1883–1898, 1998.
- [22] D. S. Wilks, *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, 4th ed. Amsterdam: Elsevier, 2019.
- [23] S. Yu, Y. Eder, D. Dennis, and J. Bhatt, "Evaluation of GPM IMERG precipitation products with gauge observations at sub-daily scales," *J. Hydrol.*, vol. 597, Art. no. 126260, Jun. 2021.
- [24] Y. Liu, L. Li, Z. Chen, and R. Deng, "Evaluation of six satellite-based precipitation products over the Chinese mainland," *Remote Sens.*, vol. 12, no. 22, Art. no. 3845, Nov. 2020.
- [25] E. Aldrian and R. D. Susanto, "Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature," *Int. J. Climatol.*, vol. 23, no. 12, pp. 1435–1452, Oct. 2003.
- [26] C. Kidd and G. Huffman, "Global precipitation measurement," *Meteorol. Appl.*, vol. 18, no. 3, pp. 334–353, Sep. 2011.
- [27] A. AghaKouchak, A. Behrangi, S. Sorooshian, K. Hsu, and E. Amitai, "Evaluation of satellite-retrieved extreme precipitation rates across the central United States," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 116, no. D2, Art. no. D02115, Jan. 2011.
- [28] BMKG, "Peraturan Kepala BMKG Nomor KEP/009/2010 tentang Prosedur Standar Operasional Pelaksanaan Peringatan Dini, Pelaporan, dan Diseminasi Informasi Cuaca Ekstrem," BMKG, Jakarta, 2010.
- [29] G. Tang, M. P. Clark, S. M. Papalexiou, Z. Ma, and Y. Hong, "Have satellite precipitation products improved over last two decades? A comprehensive comparison of GPM IMERG with nine satellite and reanalysis datasets," *Remote Sens. Environ.*, vol. 240, Art. no. 111697, Apr. 2020.
- [30] K. Sunilkumar, T. Yatagai, and M. Masuda, "Characteristics of satellite-based precipitation estimates over the complex terrain of the Western Ghats, India," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 124, no. 3, pp. 1469–1485, Feb. 2019.
- [31] O. P. Prat and B. R. Nelson, "On the link between tropical cyclones and daily rainfall extremes derived from global satellite observations," *J. Climate*, vol. 29, no. 17, pp. 6127–6139, Sep. 2016.

- [32] A. Behrangi, B. Khakbaz, T. C. Jaw, A. AghaKouchak, K. Hsu, and S. Sorooshian, "Hydrologic evaluation of satellite precipitation products over a mid-size basin," *J. Hydrol.*, vol. 397, no. 3–4, pp. 225–237, Feb. 2011.
- [33] Y. Tian, C. D. Peters-Lidard, and J. B. Eylander, "Real-time bias reduction for satellite-based precipitation estimates," *J. Hydrometeorol.*, vol. 11, no. 6, pp. 1275–1285, Dec. 2010.
- [34] M. R. P. Sapianto and P. A. Arkin, "An intercomparison and validation of high-resolution satellite precipitation estimates with 3-hourly gauge data," *J. Hydrometeorol.*, vol. 10, no. 1, pp. 149–166, Feb. 2009.
- [35] R. A. Pratama, M. A. Muhammad, and F. A. Bachtiar, "Sistem Monitoring Cuaca dan Peringatan Banjir Berbasis IoT dengan Menggunakan Aplikasi Mit App Inventor," *JITET*, vol. 11, no. 3, pp. 201–208, 2023.