

OTOMATISASI DAN VALIDASI PEMROSESAN DATA GSMAP UNTUK MONITORING CURAH HUJAN HARIAN SPASIAL DI MALUKU UTARA

Automation and Validation of GSMap Data Processing for Spatial Daily Rainfall Monitoring in North Maluku

Rayhan Rafi^{1,*),} Nadia Aurellia Amarullah², Kevin Rizky Crusia Kawilohi³, Resti maulina Chusnul Chortimah⁴, Yosik Norman⁵

^{1, *), 2), 3), 4)}Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan geofisika, ⁵⁾Stasiun Klimatologi Kelas II Tangerang Selatan

^{*}rayhan.rafi26@gmail.com

Info Artikel: **Abstract**

Dikirim:

10 November
2025

Revisi:

27 November
2025

Diterima:

23 Desember
2025

Keyword:

Accuracy,
Automation, AWS,
Estimation,
GSMap v8,
Rainfall.

Kata Kunci:

Akurasi, AWS,
Curah Hujan,
Estimasi, GSMap
v8, Otomatisasi.

*North Maluku Province is an archipelagic region with high rainfall variability; however, meteorological monitoring is often constrained by the limited and uneven distribution of ground-based observation networks. While Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMap) offers an alternative solution for spatial rainfall monitoring, previous studies have generally been limited to short-term event analyses and lack operational integration. This study aims to bridge this gap by developing an automated spatial processing workflow and validating the accuracy of daily GSMap v8 estimates over a full one-year period against Automatic Weather Station (AWS) data at four strategic locations: Labuha, Tobelo, Ternate Port, and Stageof Ternate. Validation was conducted using Pearson Correlation (*r*), Root Mean Square Error (RMSE), and Relative Bias (RB). The analysis reveals that on a daily accumulation scale, GSMap demonstrates a moderate linear relationship with observational data, showing a combined correlation coefficient (*r*) of 0.462. Estimation error is indicated by an RMSE of 15.67 mm/day with an overestimation tendency of 11.4%. GSMap accuracy in this region is identified to be influenced by the "small island effect" and significant coastline sensor errors characteristic of archipelagic areas. This study concludes that while the automated system successfully accelerates daily monitoring, the use of GSMap data for precise analysis in North Maluku requires further bias correction.*

Abstrak

Provinsi Maluku Utara merupakan wilayah kepulauan dengan variabilitas curah hujan yang tinggi, namun pemantauan kondisi meteorologis sering terkendala oleh keterbatasan jaringan pengamatan permukaan. Pemanfaatan data *Global Satellite Mapping of Precipitation* (GSMap) menawarkan solusi, namun studi terdahulu umumnya terbatas pada analisis kejadian jangka pendek dan belum terintegrasi secara operasional. Penelitian ini

bertujuan mengisi kesenjangan tersebut dengan mengembangkan alur otomatisasi pemrosesan data spasial serta memvalidasi akurasi GSMAp v8 selama satu tahun penuh terhadap data *Automatic Weather Station* (AWS) di empat lokasi strategis: Labuha, Tobelo, Pelabuhan Ternate, dan Stageof Ternate. Validasi menggunakan metode *Pearson Correlation (r)*, *Root Mean Square Error* (RMSE), dan *Relative Bias* (RB). Hasil analisis menunjukkan bahwa pada skala harian, GSMAp memiliki hubungan linear moderat (r gabungan 0,462), RMSE sebesar 15,67 mm/hari, dan kecenderungan overestimate sebesar 11,4%. Akurasi GSMAp teridentifikasi dipengaruhi oleh "*small island effect*" dan kesalahan sensor pada garis pantai (*coastline error*). Disimpulkan bahwa meskipun sistem otomatisasi berhasil mempercepat monitoring harian, penggunaan data GSMAp untuk analisis presisi di Maluku Utara tetap memerlukan koreksi bias lebih lanjut.

© 2025 STKIP Darud Da'wah wal Irsyad Pinrang

I. PENDAHULUAN

Secara umum, konsep fisika menjadi salah satu cabang kelimuan mendasar untuk membantu manusia memecahkan masalah alam melalui pendekatan fisik (Nurnaifah dkk., 2022). Curah hujan merupakan salah satu elemen kunci dalam dinamika iklim tropis karena berperan besar dalam menentukan kondisi hidrologi, pertanian, dan potensi bencana hidrometeorologi. Di wilayah kepulauan seperti Provinsi Maluku Utara, pemantauan curah hujan menjadi tantangan karena distribusi instrumen pengamatan permukaan masih terbatas dan tidak merata. Ketidakmerataan distribusi tersebut menyebabkan representasi spasial curah hujan tidak selalu sesuai dengan kondisi di lapangan, sehingga diperlukan sumber data alternatif yang mampu menggambarkan variabilitas spasial-temporal secara lebih komprehensif (Fatkhuroyan dkk., 2018).

Ketidakmerataan distribusi alat pengukur hujan permukaan seperti *Automatic Rain Gauge* (ARG) dan *Automatic Weather Station* (AWS) menyebabkan informasi curah hujan yang tersedia sering kali tidak mampu merepresentasikan kondisi spasial secara menyeluruh. Jarak antarstasiun yang cukup jauh, variasi topografi, serta lemahnya jaringan observasi di wilayah kepulauan membuat data permukaan memiliki keterbatasan dalam menggambarkan pola hujan aktual, terutama pada kejadian hujan intens dan bersifat lokal. Kondisi ini menuntut adanya sumber data tambahan yang dapat melengkapi pengamatan konvensional, data estimasi presipitasi berbasis satelit menawarkan cakupan spasial luas dan resolusi temporal tinggi sehingga menjadi alternatif yang relevan (Satgé dkk., 2019; Marta dkk., 2023).

Pemanfaatan data satelit presipitasi menjadi salah satu solusi yang penting, terutama untuk wilayah dengan observasi terbatas. Salah satu produk yang banyak digunakan adalah *Global Satellite Mapping of Precipitation* atau GSMAp, yang dikembangkan menggunakan kombinasi sensor *microwave* dan inframerah untuk menghasilkan estimasi curah hujan beresolusi tinggi (Ushio dkk., 2009; Kubota dkk., 2020). Perkembangan versi terbaru yaitu GSMAp v8 mencakup penyempurnaan algoritma yang mengurangi bias orografis serta meningkatkan kemampuan mendekripsi siklus diurnal hujan (Gao dkk., 2024; Lv dkk., 2024). Meskipun demikian, berbagai penelitian menunjukkan bahwa kinerja GSMAp bervariasi bergantung pada kondisi atmosfer, topografi, dan karakteristik hujan di wilayah tertentu (Shige dkk., 2013).

Pada konteks Indonesia, sejumlah penelitian mengenai validasi GSMAp dan produk presipitasi satelit lainnya menunjukkan bahwa estimasi satelit dapat memberikan gambaran pola hujan secara umum, tetapi tetap mengandung ketidakpastian terutama saat intensitas hujan tinggi atau saat kondisi atmosfer dipengaruhi oleh fenomena konvektif lokal (Ramadhan dkk., 2022;

Ramadhan dkk., 2023). Hasil penelitian tersebut menekankan pentingnya validasi di tingkat regional untuk memastikan kesesuaian produk satelit sebelum digunakan untuk keperluan operasional maupun penelitian klimatologi. Selain itu, kajian lokal mengenai hujan ekstrem menunjukkan bahwa bias estimasi satelit dapat meningkat pada kondisi atmosfer yang sangat aktif, sehingga pemahaman karakteristik kesalahan menjadi langkah penting dalam pemanfaatan data (Andari dkk., 2024).

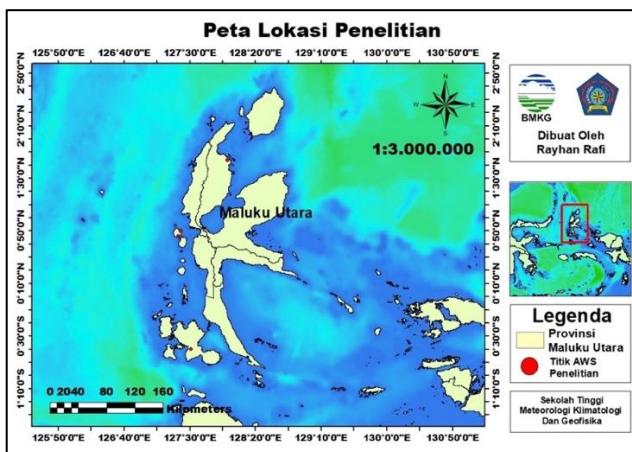
Namun, implementasi validasi berkelanjutan dan pemanfaatan operasional tersebut sering kali terkendala oleh volume data yang masif dan kompleksitas pengolahan data secara manual. Seiring dengan meningkatnya jumlah data satelit beresolusi tinggi, pengolahan data GSMAp memerlukan alur kerja otomatis agar pemrosesan dapat berlangsung secara efisien dan konsisten. Otomatisasi pemrosesan data memungkinkan ekstraksi, sinkronisasi waktu, pengakumulasi, serta uji kualitas dilakukan secara lebih cepat, sehingga mengurangi potensi kesalahan manual dan meningkatkan reproduksibilitas hasil analisis. Pendekatan alur kerja otomatis ini juga digunakan dalam pemrosesan data IMERG/GPM dan terbukti meningkatkan efisiensi serta konsistensi integrasi antara data satelit dan observasi permukaan (Nguyen dkk., 2019; Toh dkk., 2023). Pendekatan ini sangat relevan bagi lembaga operasional yang membutuhkan pembaruan data curah hujan harian secara berkelanjutan.

Mayoritas studi terdahulu cenderung berfokus pada wilayah Indonesia bagian barat atau menganalisis kejadian cuaca secara kejadian seperti studi Mustamin dkk. (2024) yang mengkaji data diurnal pada kejadian cuaca bermakna saja. Pendekatan tersebut belum cukup untuk menggambarkan performa data satelit secara kontinu dalam rentang waktu panjang (satu tahun penuh) yang mencakup berbagai faktor musiman. Selain itu, literatur yang ada umumnya terbatas pada evaluasi statistik akurasi tanpa mengintegrasikannya dengan pengembangan sistem otomasi pengolahan data spasial. Dengan adanya alur kerja sistematis ini, operasionalisasi data satelit untuk monitoring cuaca harian yang cepat, efisien, dan presisi di wilayah Indonesia akan sangat berguna untuk mengestimasi dan mencegah dampak kerusakan yang ada..

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi akurasi data GSMAp harian di Provinsi Maluku Utara serta mengembangkan alur pemrosesan otomatisnya. Evaluasi akurasi dilakukan melalui komparasi terhadap data observasi permukaan guna menjamin keandalan informasi curah hujan spasial yang dihasilkan. Melalui pengembangan validasi dan otomatisasi ini, penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap peningkatan kualitas pemantauan presipitasi di wilayah kepulauan dengan topografi kompleks, serta memperkuat pemanfaatan data satelit dalam kegiatan operasional maupun analisis klimatologi.

II. METODE PENELITIAN

Wilayah studi dalam penelitian ini mencakup Provinsi Maluku Utara yang secara astronomis terletak di antara Lintang Utara hingga Lintang Selatan dan hingga Bujur Timur. Sebagai wilayah kepulauan (*archipelagic region*), provinsi ini memiliki total 837 pulau dengan total luas wilayah daratan mencapai 32.998,696 km². Secara administratif, wilayah ini terbagi menjadi 8 kabupaten dan 2 kota dengan batas wilayah utara berbatasan langsung dengan Samudra Pasifik dan bagian timur dengan Laut Halmahera. Karakteristik topografi yang kompleks dan didominasi oleh lautan ini menyebabkan distribusi stasiun pengamatan permukaan menjadi tantangan tersendiri, sehingga validasi data satelit menjadi krusial untuk wilayah ini (BPS Provinsi Maluku Utara, 2024)



Gambar 1. Peta lokasi penelitian

Data utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah estimasi curah hujan satelit *Global Satellite Mapping of Precipitation* (GSMP) tipe Gauge-NRT (*Near Real-Time*) Versi 8 yang diperoleh melalui unduhan otomatis dari server FTP JAXA. Pemilihan algoritma versi 8 didasarkan pada peningkatan bias orografis dan penangkapan pola hujan diurnal yang relatif baik di Indonesia (Gao dkk., 2024; Ramadhan dkk., 2023). Versi ini memiliki spesifikasi resolusi spasial 0.1° atau 11km dengan resolusi temporal 1 jam. Adapun data yang diambil untuk contoh otomatisasi adalah tanggal 21, 22, dan 23 Juni 2025, sedangkan untuk validasi statistik akurasi GSMP mengambil data selama 1 tahun (1 September 2024– 31 Agustus 2025). Sebagai data acuan validasi (*ground truth*), digunakan data observasi permukaan dari empat stasiun *Automatic Weather Station* (AWS) milik BMKG yang tersebar di Provinsi Maluku Utara, meliputi AWS Stageof Ternate, AWS Pelabuhan Ternate, AWS Tobelo, dan AWS Digi Stamet Labuha.

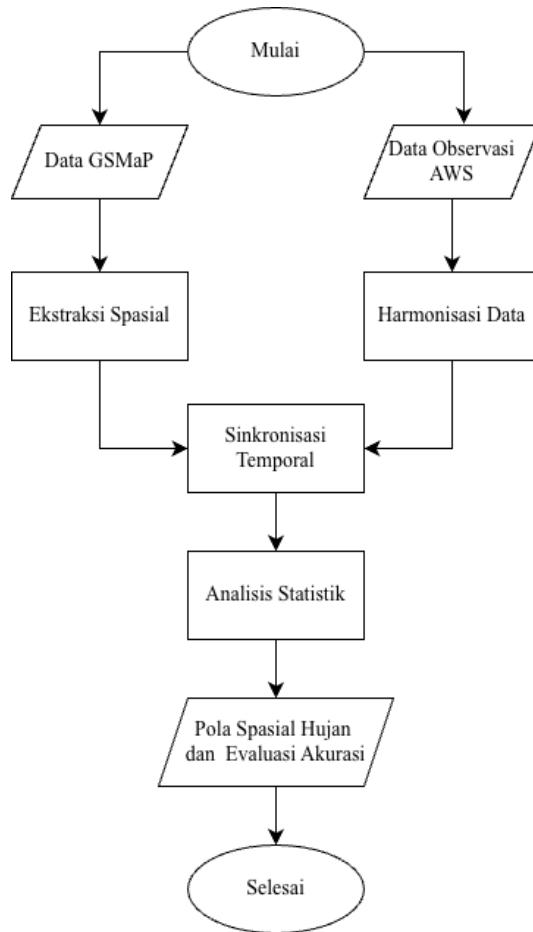
Metodologi penelitian menerapkan pendekatan kuantitatif dengan pengembangan alur kerja komputasi otomatis menggunakan bahasa pemrograman Python. Tahapan pra-pemrosesan diawali dengan harmonisasi data AWS yang memiliki resolusi waktu tinggi (1 hingga 10 menit) menjadi data format perjam (*hourly*) melalui teknik akumulasi (*summation resampling*), sehingga setara dengan satuan intensitas data satelit (mm/jam). Selanjutnya, dilakukan ekstraksi data satelit menggunakan metode *point-to-pixel* pada koordinat yang bersesuaian dengan lokasi stasiun AWS, serta sinkronisasi zona waktu kedua dataset ke dalam format *Coordinated Universal Time* (UTC) untuk memastikan akurasi perbandingan temporal (*temporal matching*).

Pada tahap analisis akhir, evaluasi kinerja GSMP dilakukan dengan mengelompokkan data berdasarkan klasifikasi intensitas hujan sesuai standar BMKG (2010) pada Perka No. 009 Tahun 2010, mulai dari hujan ringan hingga sangat lebat. Menurut Mustamin dkk (2024) yang mengambil dari Nomleni dkk (2021) dan Fadholi (2013), Validasi statistik dilakukan untuk mengetahui evaluasi kinerja data GSMP terhadap data penakar hujan AWS di mana menggunakan koefisien korelasi.

Pada validasi penelitian, dilakukan 2 kali tahap. Tahap pertama adalah membandingkan data secara diurnal untuk mengetahui bagaimana nilai statistik perbandingan antara data estimasi GSMP dengan hasil observasi setiap jam. Tahap kedua adalah membandingkan data statistik akumulasi hujan harian yang membandingkan nilai akurasi GSMP terhadap data observasi stasiun.

Evaluasi akurasi data dilakukan menggunakan tiga parameter statistik utama. Analisis korelasi bertujuan mengukur kekuatan hubungan antar variabel dengan rentang nilai 0 hingga 1, di mana nilai yang mendekati 1 mengindikasikan hubungan yang sangat kuat. Selanjutnya, *Root Mean Square Error* (RMSE) digunakan untuk mengetahui besaran penyimpangan data, di mana nilai yang semakin mendekati nol menunjukkan tingkat kesalahan yang minim dan akurasi yang

tinggi. Terakhir, *Relative Bias* (RB) berfungsi untuk mengidentifikasi bias data. Nilai positif menandakan data terukur lebih besar dibandingkan data perkiraan, sedangkan nilai negatif menunjukkan kondisi sebaliknya (Fadholi, 2013).



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Koefisien Korelasi (r)

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N p_i Q_i - \sum_{i=1}^N P_i \times \sum_{i=1}^N Q_i}{\sqrt{N \sum_{i=1}^N P_i^2 - (\sum_{i=1}^N p_i)^2} \sqrt{N \sum_{i=1}^N Q_i^2 - (\sum_{i=1}^N Q_i)^2}} \quad (1)$$

Root Mean Square Error (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{N \sum_{i=1}^N (P_i - Q_i)^2}{N}} \quad (2)$$

Relative Bias (RB)

$$RB = \frac{N \sum_{i=1}^N (P_i - Q_i)^2}{N \sum_{i=1}^N P_i} \times 100\% \quad (3)$$

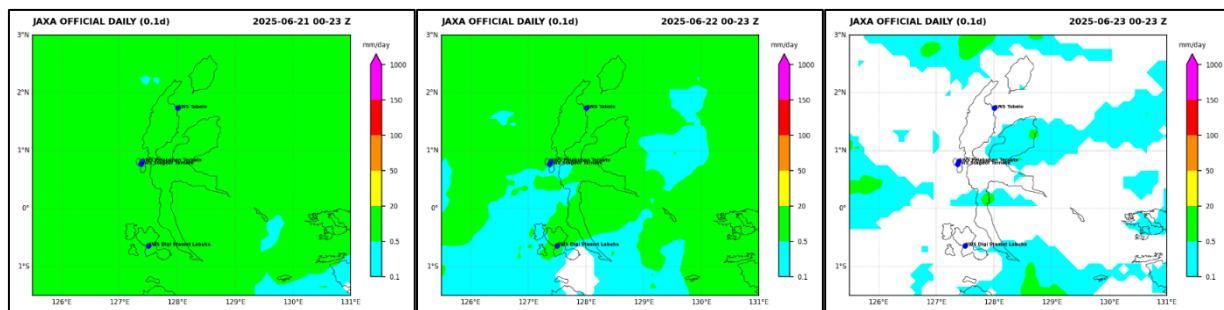
Keterangan :

P_i = data ukur penakar hujan (AWS)

Qi = data satelit GSMAp
 N = Banyaknya data

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Spasial Otomatisasi Distribusi Hujan Harian GSMAp

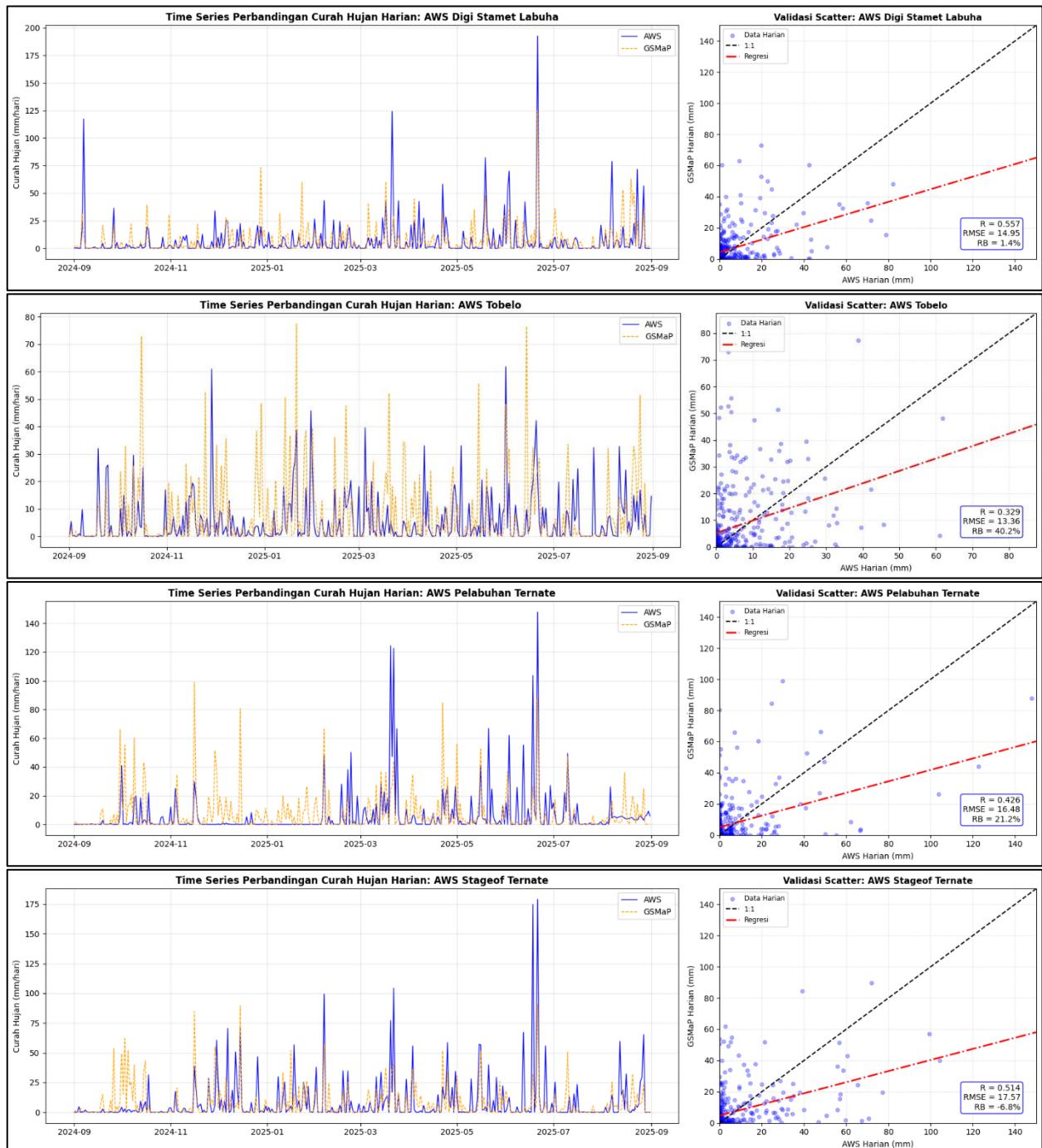


Gambar 3. Distribusi Hujan Tanggal 21 - 23 Juni 2025

Hasil keluaran sistem otomatisasi memvisualisasikan dinamika spasial curah hujan harian GSMAp yang bervariasi secara signifikan selama periode observasi 21 hingga 23 Juni 2025. Interpretasi visualisasi didasarkan pada skala warna gradasi intensitas hujan, di mana warna biru muda (*cyan*) merepresentasikan hujan intensitas sangat ringan (0.1 – 0.5 mm/hari), warna hijau menunjukkan intensitas ringan hingga sedang (0.5 – 20 mm/hari), sedangkan gradasi kuning hingga merah mengindikasikan curah hujan lebat hingga ekstrem (> 20 mm/hari). Pada tanggal 21 Juni (Gambar 2), distribusi hujan tampak relatif homogen dengan dominasi intensitas ringan (0.5 – 20 mm/hari) yang menyelimuti hampir seluruh daratan Halmahera dan perairan sekitarnya. Fenomena ini mengindikasikan keberadaan sistem cuaca skala meso yang meluas, sekaligus membuktikan keunggulan cakupan data satelit dalam melakukan *gap filling* informasi di wilayah perairan yang tidak terjangkau oleh jaringan AWS. Pola tersebut kemudian mengalami transisi pada tanggal 22 Juni di mana variabilitas spasial mulai terlihat lebih jelas. Meskipun wilayah daratan masih didominasi oleh hujan ringan, area perairan di bagian selatan dan barat daya menunjukkan pergeseran ke intensitas sangat ringan (0.1 – 0.5 mm/hari).

Sebaliknya, visualisasi pada tanggal 23 Juni memperlihatkan karakteristik hujan yang sangat kontras, yakni pola yang bersifat lokal. Peta pada tanggal ini didominasi oleh percampuran antara area tanpa hujan dan hujan ringan yang merepresentasikan aktivitas hujan konvektif di wilayah tropis. Kondisi ini menegaskan keterbatasan pemantauan jika hanya mengandalkan stasiun permukaan. Dengan jarak antar-AWS yang jauh, fenomena hujan lokal seperti ini berpotensi tidak terdeteksi. Oleh karena itu, penggunaan data GSMAp V08 dengan resolusi spasial 0.1° mampu menangkap variabilitas "basah-kering" tersebut secara lebih komprehensif dibandingkan data titik, memberikan gambaran yang lebih utuh bagi keperluan monitoring cuaca operasional.

Evaluasi Statistik dan Akurasi Data GSMAp dengan AWS Selama 1 Tahun (September 2024 – Agustus 2025)

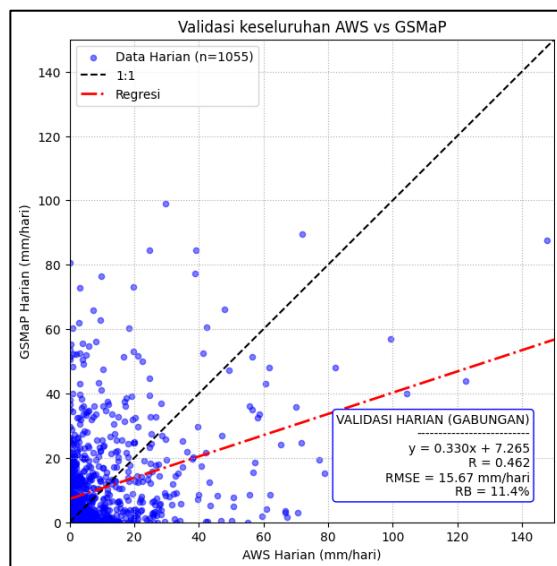


Gambar 4. Perbandingan *Time Series* Perbandingan Nilai Estimasi Curah Hujan Satelit GSMAp dengan AWS Maluku Utara dan Nilai *Scatterplot* Setiap Stasiun Selama 1 Tahun (September 2024 – Agustus 2025)

Pada gambar 5 terlihat adanya variabilitas performa estimasi curah hujan harian GSMAp yang cukup signifikan antar lokasi. Secara umum, pola sebaran data menunjukkan bahwa GSMAp memiliki kemampuan yang cukup baik dalam mendekripsi kejadian hari tanpa hujan dan hujan ringan, yang ditandai dengan menumpuknya titik data di area *intercept* (koordinat 0,0). Namun,

deviasi atau penyebaran data mulai melebar seiring dengan meningkatnya intensitas curah hujan, yang mengindikasikan penurunan akurasi pada kejadian hujan lebat.

Pada AWS Digi Stamet Labuha & AWS Stasiun Geofisika Ternate, kedua stasiun ini menunjukkan pola linieritas yang relatif lebih stabil dibandingkan stasiun lainnya. Nilai korelasi (r) pada kedua stasiun ini umumnya merepresentasikan performa terbaik di wilayah studi di mana mencapai 0.557 untuk AWS Digi Stamet Labuha dan 0.514 untuk AWS Stageof Ternate yang menunjukkan bahwa algoritma GSMAp cukup responsif terhadap pola hujan di wilayah selatan (Labuha) dan pusat pulau Ternate (Stasiun Geofisika). Pada AWS Pelabuhan Ternate menunjukkan sebaran data yang paling acak dibandingkan stasiun lainnya dengan korelasi 0.426 di mana cenderung *overestimate*. Pada stasiun Tobelo, terlihat nilai korelasi yang rendah (0.329) yang mengindikasikan hubungan cenderung lemah di antara tiga stasiun lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa AWS Stasiun Tobelo menjadi daerah yang kurang responsif di antara stasiun penakar hujan lainnya.



Gambar 5. Validasi Akumulasi Harian Perbandingan GSMAp dengan AWS Maluku Utara Selama 1 Tahun (September 2024 – Agustus 2025)

Secara regional, performa estimasi curah hujan satelit GSMAp di wilayah Maluku Utara dievaluasi melalui *scatter plot* gabungan dari empat stasiun pengamatan (Gambar 6). Hasil analisis statistik menunjukkan nilai koefisien korelasi (r) sebesar 0.462. Nilai ini mengindikasikan bahwa GSMAp memiliki tingkat akurasi moderat dalam mengestimasi variabilitas curah hujan harian di wilayah kepulauan ini. Visualisasi *scatter plot* memperlihatkan pola distribusi data yang cukup menyebar, terutama pada kejadian curah hujan dengan intensitas sedang hingga lebat. Hal ini dikonfirmasi oleh nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 15.67 mm/hari, yang merepresentasikan rata-rata besaran kesalahan absolut satelit terhadap data observasi. Selain itu, nilai *Relative Bias* (RB) bertanda positif sebesar 11.4% menunjukkan adanya kecenderungan *overestimate* sistematis oleh satelit. Hal ini juga didukung oleh nilai regresi linear menghasilkan persamaan $y = 0.330x + 7.265$. Artinya, secara akumulatif, GSMAp menaksir jumlah curah hujan yang lebih tinggi daripada yang tercatat oleh penakar hujan di permukaan (AWS). Jika dilihat secara visual, kecenderungan *overestimate* ini sebenarnya didominasi oleh AWS Tobelo dan AWS Pelabuhan Ternate sehingga mempengaruhi nilai statistiknya.

Kondisi topografi di Wilayah Maluku Utara menjadi tantangan tersendiri dalam estimasi curah hujan berbasis satelit. Sebagai wilayah kepulauan dengan daratan yang sempit, resolusi spasial satelit 0.1° (sekitar 11×11 km) sering kali mencakup area campuran darat dan laut dalam

satu piksel (*mixed pixel*). Fenomena ini menyebabkan penurunan sensitivitas sensor dalam membedakan emisi radiasi hujan di atas daratan sempit, karena adanya kontras radiometrik yang tajam antara permukaan laut yang 'dingin' dan daratan yang 'hangat'. Studi literatur mengonfirmasi bahwa wilayah pesisir dan kepulauan di Benua Maritim memiliki ketidakpastian estimasi yang lebih tinggi akibat kompleksitas tersebut, yang sering kali berujung pada bias pengukuran. Hal ini sejalan dengan temuan (Yuda dkk. (2020) yang menunjukkan bahwa akurasi produk satelit cenderung menurun pada topografi kompleks di pulau kecil, Faktor inilah yang berkontribusi pada korelasi yang lebih rendah dan bias positif yang teramat dalam penelitian ini.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan mengenai validasi data curah hujan satelit Penelitian ini menghasilkan dua kesimpulan utama. Pertama, pengembangan alur kerja otomatisasi berbasis Python terbukti berhasil meningkatkan efisiensi pemrosesan data, yang krusial untuk mengisi kekosongan informasi (*gap filling*) pemantauan cuaca di wilayah kepulauan dengan jaringan observasi terbatas. Kedua, validasi hidrometeorologis menunjukkan bahwa meskipun GSMAp mampu menangkap pola umum fluktuasi hujan harian, produk ini memiliki keterbatasan presisi pada skala lokal. Adanya kecenderungan estimasi berlebih (*overestimate*) dan bias sistematis mengindikasikan bahwa resolusi satelit mengalami kendala "efek rata-rata spasial" (*areal averaging effect*) serta kesalahan deteksi di wilayah pesisir. Oleh karena itu, data GSMAp v8 direkomendasikan sebagai instrumen pemantauan distribusi spasial regional, namun penggunaannya untuk analisis kuantitatif titik spesifik (point-based) memerlukan penerapan metode koreksi bias guna mereduksi ketidakpastian data.

Berdasarkan temuan tersebut, penelitian ini menyarankan beberapa hal. Pertama, mengevaluasi pemilihan produk GSMAp yang akan dipilih guna menunjang produk mana yang paling sesuai dan cocok untuk wilayah tertentu. Kedua, perlunya penerapan metode koreksi bias (*bias correction*) tingkat lanjut sebelum data GSMAp digunakan untuk kepentingan analisis kuantitatif nilai ekstrem pada skala titik lokal. Ketiga, penelitian di masa mendatang sangat disarankan untuk memperluas evaluasi menggunakan skala temporal yang lebih panjang, seperti periode musiman atau tahunan, guna memverifikasi stabilitas nilai korelasi dan mendapatkan gambaran performa satelit yang lebih representatif secara klimatologis. Keempat disarankan pula untuk melakukan studi komparasi dengan produk satelit presipitasi global lainnya (seperti GPM-IMERG atau CHIRPS) untuk menentukan produk yang paling adaptif terhadap karakteristik topografi kepulauan di Maluku Utara.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Program Studi D-IV Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG) atas fasilitas dan dukungan akademik yang diberikan selama penyusunan penelitian ini. Apresiasi dan rasa terima kasih secara khusus penulis sampaikan kepada Bapak Yosik Norman selaku dosen pengampu yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta masukan berharga dalam pengembangan metode komputasi dan analisis meteorologis. Penulis juga berterima kasih kepada seluruh sivitas akademika STMKG serta rekan-rekan yang telah memberikan dukungan moril dan diskusi konstruktif sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Andari, R., Nurhamidah, Daoed, D., & Marzuki. (2024). Validation of TRMM and GPM Satellite Data Using Daily Precipitation Observations. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 14(2), 555–562. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.14.2.18980>
- BMKG. (2010). *Peraturan Kepala Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika Nomor 9 Tahun 2010 tentang Prosedur Standar Operasional Pelaksanaan Peringatan Dini, Pelaporan, dan Diseminasi Informasi Cuaca Ekstrim.* <https://peraturan.bpk.go.id/Details/191418/perka-bmkg-no-kep9-tahun-2010>
- BPS Provinsi Maluku Utara. (2024). *Provinsi Maluku Utara Dalam Angka 2024* (Vol. 24). BPS Provinsi Maluku Utara. <https://malut.bps.go.id/id/publication/2024/02/28/83811d5deb662f5db267ba66/provinsi-maluku-utara-dalam-angka-2024.html>
- Fadholi, A. (2013). Persamaan Regresi Prediksi Curah Hujan Bulanan Menggunakan Data Suhu dan Kelembapan Udara di Ternate. *Statistika*, 13(1), 7–16.
- Fatkhuroyan, F., Wati, T., Sukmana, A., & Kurniawan, R. (2018). Validation of Satellite Daily Rainfall Estimates Over Indonesia. *Forum Geografi*, 32(2), 170–180. <https://doi.org/10.23917/forgeo.v32i2.6288>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107517>
- Kubota, T., Aonashi, K., Ushio, T., Shige, S., Takayabu, Y. N., Kachi, M., Arai, Y., Tashima, T., Masaki, T., Kawamoto, N., Mega, T., Yamamoto, M. K., Hamada, A., Yamaji, M., Liu, G., & Oki, R. (2020). *Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMAp) Products in the GPM Era* (hlm. 355–373). https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9_20
- Lv, X., Guo, H., Tian, Y., Meng, X., Bao, A., & De Maeyer, P. (2024). Evaluation of GSMAp Version 8 Precipitation Products on an Hourly Timescale over Mainland China. *Remote Sensing*, 16(1), 210. <https://doi.org/10.3390/rs16010210>
- Marta, S. D., Suhartanto, E., & Fidari, J. S. (2023). Validasi Data Curah Hujan Satelit dengan Data Stasiun Hujan di DAS Ngasinan Hulu, Kabupaten Trenggalek, Jawa Timur. *Jurnal Teknologi*

dan Rekayasa Sumber Daya Air, 3(1), 35–45.
<https://doi.org/10.21776/ub.jtresa.2023.003.01.04>

Mustamin, M. R., Maricar, F., Lopa, R. T., & Karamma, R. (2024a). Validasi Akurasi Data Curah Hujan Per-Jam GSMAp Menggunakan ARR Tersebar di Sulawesi Selatan. *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*. <https://doi.org/10.56860/jtsda.v4i1.93>

Mustamin, M. R., Maricar, F., Lopa, R. T., & Karamma, R. (2024b). Validasi Akurasi Data Curah Hujan Per-Jam GSMAp Menggunakan ARR Tersebar di Sulawesi Selatan. *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*. <https://doi.org/10.56860/jtsda.v4i1.93>

Nguyen, P., Shearer, E. J., Tran, H., Ombadi, M., Hayatbini, N., Palacios, T., Huynh, P., Braithwaite, D., Updegraff, G., Hsu, K., Kuligowski, B., Logan, W. S., & Sorooshian, S. (2019). The CHRS Data Portal, an easily accessible public repository for PERSIANN global satellite precipitation data. *Scientific Data*, 6(1), 180296. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.296>

Nomleni, A., Suhartanto, E., & Harisuseno, D. (2021). Estimation of Flow Discharge Model at Temef Watershed - East Nusa Tenggara Using TRMM Satellite Data. *Civil and Environmental Science*, 004(02), 115–126. <https://doi.org/10.21776/ub.civense.2021.00402.2>

Nurnaifah, I. I., Akhfari, M., & Nursyam. (2022). Pengaruh Gaya Belajar terhadap Hasil Belajar Fisika Siswa. *Al-Irsyad Journal of Physics Education*, 1(2), 86–94. <https://doi.org/10.58917/ijpe.v1i2.19>

Ramadhan, R., Marzuki, M., Yusnaini, H., Muhsaryah, R., Tangang, F., Vonnisa, M., & Harmadi, H. (2023). A Preliminary Assessment of the GSMAp Version 08 Products over Indonesian Maritime Continent against Gauge Data. *Remote Sensing*, 15(4), 1115. <https://doi.org/10.3390/rs15041115>

Ramadhan, R., Muhsaryah, R., Marzuki, Yusnaini, H., Vonnisa, M., Hashiguchi, H., Suryanto, W., & Sholihun. (2022). Evaluation of GPM IMERG Products for Extreme Precipitation over Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 2309(1), 012008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2309/1/012008>

Satgé, F., Ruelland, D., Bonnet, M.-P., Molina, J., & Pillco, R. (2019). Consistency of satellite-based precipitation products in space and over time compared with gauge observations and

- snow- hydrological modelling in the Lake Titicaca region. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(1), 595–619. <https://doi.org/10.5194/hess-23-595-2019>
- Shige, S., Kida, S., Ashiwake, H., Kubota, T., & Aonashi, K. (2013). Improvement of TMI Rain Retrievals in Mountainous Areas. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(1), 242–254. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-074.1>
- Toh, S. C., Lai, S. H., Mirzaei, M., Soo, E. Z. X., & Teo, F. Y. (2023). Sequential Data Processing for IMERG Satellite Rainfall Comparison and Improvement Using LSTM and ADAM Optimizer. *Applied Sciences*, 13(12), 7237. <https://doi.org/10.3390/app13127237>
- Ushio, T., Sasashige, K., Kubota, T., Shige, S., Okamoto, K., Aonashi, K., Inoue, T., Takahashi, N., Iguchi, T., Kachi, M., Oki, R., Morimoto, T., & Kawasaki, Z.-I. (2009). A Kalman Filter Approach to the Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) from Combined Passive Microwave and Infrared Radiometric Data. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 87A, 137–151. <https://doi.org/10.2151/jmsj.87A.137>
- Yuda, I. W. A., Prasetia, R., As-syakur, Abd. R., Osawa, T., & Nagai, M. (2020). An assessment of IMERG rainfall products over Bali at multiple time scale. *E3S Web of Conferences*, 153, 02001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015302001>