

Akurasi Data Curah Hujan dari Radar Cuaca, Satelit dan Reanalisis di Pesisir Utara Jawa Tengah

Ahmad Faa Iziyn^{1*}, Anindya Wirasatriya², Elis Indrayanti², Eko Prasetyo³

¹Program Doktorat Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro

²Departemen Oseanografi, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Jacob Rais, Tembalang Semarang, Jawa Tengah 50265 Indonesia

³Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG)

Jl. Angkasa I No.2 Kemayoran, Jakarta Pusat 10610, Indonesia

Email: *ahmadfaaizyn@gmail.com

Abstrak

Pesisir Utara Jawa Tengah dikenal sebagai kawasan dengan tingkat kerentanan tinggi terhadap bencana hidrometeorologi dan kebutuhan *multi-user* sehingga dibutuhkan data informasi curah hujan yang akurat dan beresolusi tinggi. Kajian komparatif akurasi radar cuaca tipe C-Band dengan dual polarisasi yang mulai operasional di Semarang pada tahun 2024 terhadap produk satelit GSMaP dan reanalisis ERA5 di wilayah ini masih terbatas. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi dan membandingkan kinerja ketiga sumber data tersebut terhadap observasi enam stasiun hujan *Automatic Rain Gauge (ARG)* dan *Automatic Weather Station (AWS)* periode Januari 2024 hingga Juni 2025. Validasi dilakukan menggunakan *Mean Bias Error (MBE)* dan *Root Mean Square Error (RMSE)* pada skala harian dan bulanan. Hasil menunjukkan radar C-Band memiliki kinerja terbaik dengan MBE 0,10 milimeter (harian) dan 0,21 milimeter (bulanan), serta RMSE terendah sebesar 5,01 milimeter (harian) dan 1,02 milimeter (bulanan). GSMaP menunjukkan performa mendekati radar pada skala bulanan (MBE 0,02 milimeter; RMSE 4,01 milimeter). Sedangkan ERA5 memiliki bias lebih variatif (MBE 0,07 sampai dengan 2,13 milimeter) dan RMSE tertinggi pada skala harian 17,98 milimeter. Hasil penelitian ini menegaskan keunggulan radar C-Band untuk analisis curah hujan resolusi tinggi dalam waktu jangka pendek di wilayah pesisir, sekaligus menunjukkan potensi GSMaP dan ERA5 sebagai alternatif untuk kajian klimatologis jangka panjang.

Kata kunci: Curah hujan, Radar Cuaca C-Band, GSMaP, ERA5, Pesisir Utara Jawa Tengah

Abstract

Accuracy of Rainfall Data from Weather Radars, Satellites, and Reanalysis Along the North Coast of Central Java

The northern coastal region of Central Java is known as an area with a high level of vulnerability to hydrometeorological disasters and multi-user needs, an accurate and high-resolution rainfall information is required. Comparative studies on the accuracy of the C-Band weather radar with dual polarization, which became operational in Semarang in 2024, against GSMaP satellite products and ERA5 reanalysis in this region are still limited. This study aims to evaluate and compare the performance of these three data sources against observations from six rain gauge stations Automatic Rain Gauge (ARG) and Automatic Weather Station (AWS) during the period from January 2024 to June 2025. Validation was carried out by using Mean Bias Error (MBE) and Root Mean Square Error (RMSE) at daily and monthly scales. The results show that the C-Band radar provides the best performance with a bias of 0.10 millimeters (daily) and 0.21 millimeters (monthly), and the lowest RMSE values of 5.01 millimeters (daily) and 1.02 millimeters (monthly). GSMaP shows performance close to radar at the monthly scale (bias 0.02 millimeters; RMSE 4.01 millimeters), while ERA5 exhibits more variable bias (MBE ranging from 0.07 to 2.13 millimeter) and the highest RMSE at the daily scale 17.98 millimeter. This study confirms the superiority of C-Band radar for high-resolution short-term rainfall analysis in coastal areas, while also demonstrating the potential of GSMaP and ERA5 as alternative datasets for long-term climatological studies.

Keywords: Rainfall, C-Band Weather Radar, GSMaP, ERA5, North Coast of Central Java

PENDAHULUAN

Wilayah pesisir utara Jawa Tengah dikenal sebagai kawasan dengan tingkat kerentanan tinggi terhadap bencana hidrometeorologi (Akhirianto, *et al.*, 2025). Intensitas curah hujan tinggi dapat memicu bencana hidrometeorologi sehingga diperlukan Informasi curah hujan yang akurat (Marengo *et al.*, 2021). Ketersediaan berbagai sumber data, seperti radar cuaca C-Band, satelit cuaca, dan reanalisis data yang memberikan peluang untuk memperkuat analisis hidrometeorologi, namun perbedaan akurasi data masih menjadi tantangan. Radar cuaca merupakan salah satu alat meteorologi yang dapat membantu mengamati cuaca secara khusus dan mampu mendeteksi adanya pertumbuhan sel-sel konvektif mulai dari fase pertumbuhan, tahap matang, hingga fase purnah (Fitria, 2016). Pemantauan dan pengamatan curah hujan akurat dengan resolusi temporal dan spasial tinggi, penting untuk dilakukan dalam rangka pencegahan dan mitigasi bencana hidrometeorologi (Zheng, *et al.*, 2021). Radar menggunakan pantulan gelombang (*echo*) hasil dari pemindaian beberapa level untuk mendeteksi awan dan pergerakannya, sebaran dan intensitas hujan, kecepatan arah dan angin, dan badai guntur (Kim, *et al.*, 2024).

Perubahan kondisi cuaca, sangat cepat terjadi dan juga bersifat lokal. Radar cuaca merupakan instrumen yang digunakan untuk mengidentifikasi dan menggambarkan potensi intensitas curah hujan yang terdeteksi oleh sistem radar (Utomo *et al.*, 2019). Hasil pengamatan menggunakan radar cuaca lebih rinci tetapi cakupannya lebih sempit (Prasetyo, *et al.*, 2020). Semakin dekat lokasi radar maka semakin bagus hasil yang diperoleh. Selain itu juga Radar memiliki resolusi waktu yang cukup bagus yaitu 10 menit. Sehingga perubahan cuaca dalam skala lokal (kecil) dan dalam durasi singkat dapat diketahui. Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) menggunakan Radar cuaca tersebut sebagai penunjang sistem peringatan dini meteorologi, *Meteorology Early Warning System* (MEWS), yang bertujuan mengurangi dampak kerugian materi dan jiwa akibat cuaca ekstrem. Penakar hujan otomatis seperti *Automatic Rain Gauge* (ARG) dan *Automatic Weather Station* (AWS) dapat digunakan untuk mengukur curah hujan di suatu titik pengamatan. Namun peralatan tersebut memiliki area atau cakupan yang cukup rendah, sehingga belum dapat menjangkau secara luas wilayah (Qiu, *et al.*, 2020). Radar cuaca mempunyai kelebihan dalam resolusi spasial dan temporal tinggi sehingga dapat menjangkau area yang belum memiliki jaringan peralatan curah hujan (Ananda, *et al.*, 2023).

Hasil penelitian terdahulu yang dilakukan di daerah Pontianak dan sekitarnya dengan menggunakan radar cuaca Pontianak yang merupakan single polarisasi radar dengan tipe C-Band menunjukkan bahwa nilai RMSE terendah pada estimasi radar sebesar 3,834 (Mulya, *et al.*, 2022). Hodson (2022) menyatakan bahwa semakin kecil nilai RMSE maka performa model prediksi semakin baik. Selain itu penelitian di wilayah Jawa barat dengan menggunakan radar cuaca Tangerang dengan single polarisasi dan tipe C-Band menghasilkan akurasi data radar cuaca masih tergolong *underestimate* terhadap data curah hujan aktual (Naufal, *et al.*, 2024). Penelitian yang dilakukan oleh Sharma *et al.* (2025) menunjukkan bahwa hasil estimasi curah hujan radar cenderung mengalami *overestimate* terhadap curah hujan hasil pengukuran rain gauge, bergantung pada intensitas hujan dan karakteristik hubungan $Z - R$ yang digunakan. Pemanfaatannya dalam penelitian di wilayah pesisir utara Jawa Tengah masih sangat terbatas dikarenakan radar cuaca tipe C-Band dengan dual polarisasi baru beroperasi di Semarang pada tahun 2024. Selama ini, kajian curah hujan di wilayah tersebut lebih banyak mengandalkan data observasi stasiun hujan yang sebarannya tidak merata atau data satelit yang memiliki keterbatasan akurasi pada skala lokal. Hal ini menimbulkan kesenjangan penelitian, yaitu belum optimalnya pemanfaatan radar cuaca untuk memahami distribusi spasial-temporal curah hujan, terutama pada wilayah pesisir yang sangat rentan terhadap kondisi cuaca ekstrem seperti hujan lebat dan lainnya. Selama ini, pengamatan curah hujan umumnya dilakukan menggunakan stasiun hujan konvensional. Distribusi penakar hujan di Jawa Tengah masih terbatas dan jaraknya relatif berjauhan sehingga kurang mampu menggambarkan variasi spasial curah hujan secara detail. Kondisi ini menjadi kendala dalam penyediaan informasi yang cepat, akurat, dan representatif untuk kepentingan mitigasi bencana hidrometeorologi.

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan akurasi data curah hujan yang diperoleh dari radar cuaca C-Band, satelit cuaca GSMaP, dan data reanalisis (ERA5) terhadap hujan aktual dari enam titik penakar hujan otomatis *Automatic Rain Gauge* (ARG) dan *Automatic Weather Station* (AWS) di wilayah pesisir Utara Jawa Tengah. Validasi dilakukan menggunakan metode evaluasi statistik *Mean Bias Error* (MBE) dan *Root Mean Square Error* (RMSE) dalam skala harian maupun bulanan terhadap data observasi enam stasiun hujan (ARG dan AWS) pada periode Januari 2024 – Juni 2025 di wilayah pesisir Utara Jawa Tengah.

MATERI DAN METODE

Waktu dan Lokasi Penelitian

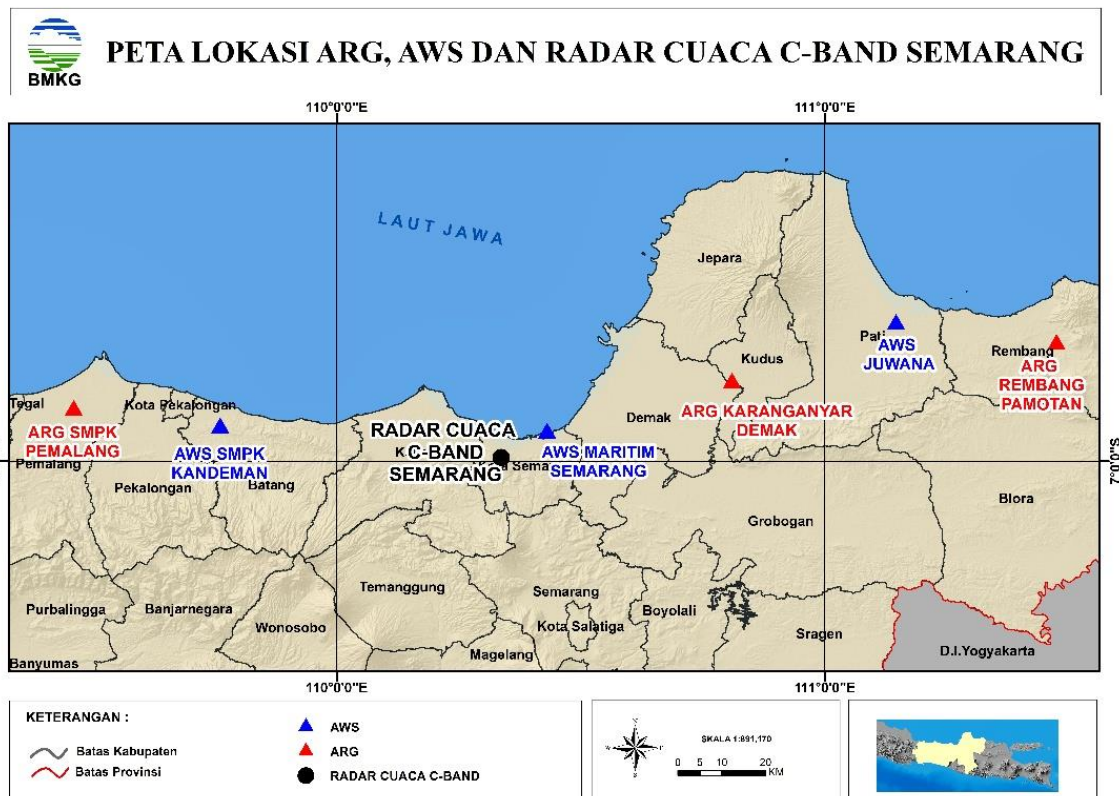
Lokasi penelitian terletak di pesisir Utara Jawa Tengah pada peta ditampilkan dalam Gambar 1. Wilayah ini dipilih karena wilayahnya rentan terjadi bencana hidrometeorologi akibat cuaca ekstrem dan cakupan radius terbaik dari Radar Cuaca C-Band yang berada di Semarang. Data curah hujan yang digunakan selama periode Januari 2024 hingga Juni 2025.

Materi Penelitian

Materi yang digunakan yaitu data curah hujan harian dan rata-rata bulanan. Data curah hujan bersumber dari data reflektivitas Radar Cuaca C-Band yang didapat dan diolah melalui server di BMKG Stasiun Meteorologi Ahmad Yani Semarang dengan resolusi 0.01° (1 km). Data citra *Global Satellite Mapping of Precipitation* (GSMaP) yang disediakan oleh *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) dengan resolusi spasial 0.1° (10 km) dan temporal harian (mm/hari) (M. Yamaji, *et al.*, 2023). Data reanalisis ERA5 yang dikembangkan oleh *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) memiliki resolusi spasial 0.25° (25 km) dan resolusi temporal harian (Raoult *et al.*, 2017). Data curah hujan yang digunakan selama periode Januari 2024 hingga Juni 2025.

Pengolahan Data

Pengolahan data radar cuaca C-band Semarang dengan cara mengkonversi data kedalam format *rawdata* agar bisa diolah menggunakan perangkat lunak Rainbow sehingga dihasilkan data curah hujan. Dalam analisis ini digunakan produk *Column Maximum* (CMAX). Data radar CMAX menampilkan nilai maksimum dari reflektivitas dalam suatu kolom udara tanpa memperhatikan posisi ketinggian (Manurung, 2016). CMAX merupakan produk yang sangat berguna dalam mendeteksi lokasi terjadinya awan konvektif dan potensi cuaca buruk dengan menampilkan nilai maksimum dan minimum dari suatu kolom vertikal (Wati dan Wiguna, 2016). Data tersebut kemudian diolah menggunakan metode pendekatan Z-R Marshall-Palmer sehingga menghasilkan nilai estimasi curah hujan (Sharma, *et al.*, 2025).



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Metode pengolahan pendekatan Z-R dengan persamaan sebagai berikut:

$$Z = aR^b$$

Z didefinisikan sebagai reflektivitas dari pengamatan radar (mm⁶/ mm³), R adalah intensitas curah hujan (mm) serta a dan b merupakan konstanta empiris positif yang dipengaruhi oleh kondisi geografis dan karakteristik iklim pada masing masing lokasi radar. Reflektivitas radar (Z) diukur dalam satuan desibel (dB) melalui persamaan (Hutapea, et al., 2021) :

$$dBZ = 10\log_{10}(Z)$$

Pada penelitian ini menggunakan metode pengolahan pendekatan Z-R Marshall-Palmer, dengan persamaan matematis sebagai berikut (Tahir, et al., 2022) :

$$Z = 200R^{1,6}$$

Radar cuaca secara kontinu melakukan pengamatan setiap 10 menit, sedangkan peralatan curah hujan melakukan pengukuran curah hujan secara akumulatif tiap jam (Hutapea, et al., 2021). *Automatic Rain Gauge* (ARG) dijadikan acuan standar pengukuran curah hujan dan data estimasi curah hujan dari radar cuaca menggunakan persamaan Z-R Marshall-Palmer. dijadikan sebagai data uji. *CHradar* adalah estimasi curah hujan dari citra radar menggunakan Z-R Marshall- Palmer, and *CHgauge* adalah pengukuran curah hujan di lokasi ARG. Pengolahan satelit cuaca GSMaP dan reanalisis ERA5 pada penelitian setiap data kali ini melalui langkah pertama yang dilakukan adalah mengekstrak data harian selanjutnya mengkompilasi rata-rata bulanan.

Analisis Kuantitatif

Analisis kuantitatif dilakukan pada hasil estimasi curah hujan radar dan curah hujan penakar menggunakan metode statistik Root Mean Square Error (RMSE), koefisien korelasi, dan *Mean Bias Error* (MBE). Nilai RMSE merupakan nilai error dari hasil estimasi terhadap nilai yang sebenarnya. Semakin kecil nilai RMSE menunjukkan hasil estimasi yang dilakukan semakin baik (Hodson. T.O., 2022). RMSE dihitung dengan persamaan :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (re_i - ro_i)^2}{N}}$$

Nilai RMSE berada pada rentang nol hingga tak terhingga dan memiliki hubungan berbanding terbalik terhadap tingkat kesalahan, sehingga semakin kecil nilai RMSE maka akurasi hasil estimasi atau prediksi semakin baik (E. Camporeale, 2021). Dimana RMSE merupakan *Root Mean Square Error*, N adalah jumlah data, ro adalah nilai observasi dan re merupakan nilai estimasi. Nilai MBE menunjukkan ketidakpastian pada estimasi atau perbedaan antara nilai estimasi dengan nilai yang sebenarnya. Jika nilai estimasi yang dilakukan mendekati nilai sebenarnya (data observasi), maka nilai MBE akan mendekati 0. Nilai MBE didapat dengan persamaan (2), dimana MBE merupakan nilai *Mean Bias Error* , N adalah jumlah data, ro adalah nilai observasi dan re merupakan nilai estimasi:

$$MBE = \frac{\sum_{n=1}^N (re - ro)}{N}$$

Dalam penelitian ini, klasifikasi intensitas curah hujan mengacu pada kategori curah hujan harian Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) dan World Meteorological Organization (WMO) yaitu hujan ringan (0–20 mm/hari), hujan sedang (20–50 mm/hari), hujan lebat (50–100 mm/hari), dan hujan sangat lebat (>100 mm/hari). Berdasarkan klasifikasi tersebut, peristiwa hujan dengan intensitas menengah hingga tinggi pada penelitian ini merujuk pada kategori hujan sedang hingga lebat (>50 mm/hari). Klasifikasi ini digunakan untuk mengevaluasi kemampuan radar C-Band, GSMaP, dan ERA5 dalam merepresentasikan variasi intensitas curah hujan di wilayah penelitian (WMO, 2018).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Performa radar cuaca C-Band yang lebih baik dibandingkan GSMaP dan ERA5 pada penelitian ini dapat dijelaskan karena radar melakukan pengamatan langsung terhadap partikel presipitasi di atmosfer dengan resolusi spasial dan temporal yang tinggi. Karakteristik ini memungkinkan radar menangkap dinamika hujan konvektif lokal yang umum terjadi di wilayah pesisir Utara Jawa Tengah secara lebih detail. Hujan di wilayah

tropis maritim seperti Indonesia umumnya bersifat sporadis, intens, dan berkembang cepat sehingga lebih sulit direpresentasikan oleh data grid satelit maupun reanalisis yang memiliki resolusi lebih kasar. Kondisi tersebut menyebabkan estimasi radar memiliki bias yang lebih kecil dan RMSE lebih rendah dibandingkan GSMaP maupun ERA5. Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa observasi radar sangat efektif untuk pemantauan hujan intensitas tinggi dan fenomena mesoskal di wilayah tropis pesisir (Alex *et al.*, 2025).

Sebaliknya, satelit GSMaP menunjukkan kecenderungan overestimasi pada beberapa lokasi karena algoritma estimasi curah hujan berbasis satelit memiliki keterbatasan dalam membedakan tipe awan hujan dan awan non-hujan, khususnya pada awan tipis, awan hangat (warm cloud), maupun sistem konvektif tropis yang berkembang cepat. Selain itu, estimasi berbasis gelombang mikro pasif dan inframerah dapat menghasilkan ketidakpastian pada wilayah pesisir dan laut akibat pengaruh emissivitas permukaan yang kompleks. Penelitian Masaki *et al.* (2020) menjelaskan bahwa produk GSMaP masih memiliki ketidakpastian pada hujan intensitas tinggi dan wilayah tropis maritim yang kompleks. Data reanalisis ERA5 juga memperlihatkan bias positif dan RMSE yang lebih besar karena data ini bukan hasil pengamatan langsung, melainkan hasil asimilasi model numerik atmosfer global dengan resolusi spasial yang relatif kasar. Resolusi tersebut menyebabkan fenomena hujan lokal dan konveksi skala kecil di wilayah pesisir Utara Jawa Tengah tidak seluruhnya dapat direpresentasikan dengan baik. Selain itu, parameterisasi konveksi dalam model numerik sering menghasilkan smoothing terhadap intensitas hujan sehingga distribusi hujan lokal menjadi kurang akurat (Hersbach *et al.*, 2020).

Nilai RMSE radar yang rendah pada lokasi seperti AWS Juwana dan ARG Rembang Pamotan menunjukkan bahwa radar C-Band Semarang cukup representatif dalam menggambarkan distribusi hujan lokal di area tersebut. Hal ini kemungkinan dipengaruhi oleh jarak lokasi yang masih berada dalam cakupan optimal radar sehingga attenuasi sinyal dan *beam blocking* relatif kecil. Selain itu, topografi wilayah pesisir Utara Jawa Tengah yang relatif datar juga mendukung kualitas observasi radar yang lebih baik dibanding wilayah pegunungan. Berdasarkan hasil penelitian ini, radar cuaca C-Band lebih direkomendasikan untuk analisis jangka pendek, seperti pemantauan cuaca harian, nowcasting, analisis kejadian hujan ekstrem dan sistem peringatan dini banjir. Hal ini karena radar memiliki resolusi temporal tinggi dan mampu menangkap dinamika hujan secara real time. Namun, penggunaan radar untuk analisis klimatologi jangka panjang masih memiliki keterbatasan karena data radar relatif baru, kontinuitas data dipengaruhi pemeliharaan alat, serta adanya kemungkinan perubahan kalibrasi sistem dari waktu ke waktu.

Untuk analisis jangka panjang, data GSMaP dan ERA5 lebih direkomendasikan karena memiliki cakupan data historis yang panjang, konsisten, dan tersedia secara kontinu. GSMaP cocok digunakan untuk analisis variabilitas curah hujan regional dan monitoring daerah dengan keterbatasan pengamatan permukaan, sedangkan ERA5 lebih sesuai untuk studi klimatologi, analisis dinamika atmosfer dan kajian hubungan hujan dengan parameter meteorologi lainnya. Meskipun demikian, kedua data tersebut tetap memerlukan koreksi bias menggunakan data observasi lokal agar akurasinya meningkat pada skala wilayah penelitian.

Gambar 3. memperlihatkan perbandingan antara data curah hujan hasil pengukuran AWS Maritim Semarang (sumbu X) dan estimasi radar cuaca C-Band (sumbu Y). Garis putus-putus merepresentasikan kondisi ideal di mana nilai radar sama dengan nilai pengamatan AWS dan ARG. Nilai bias positif mengindikasikan bahwa secara umum radar cuaca cenderung sedikit melebihi estimasi curah hujan dibandingkan dengan pengukuran AWS dan ARG. Nilai RMSE yang relatif tinggi menunjukkan adanya penyebaran kesalahan yang cukup bervariasi, khususnya pada intensitas hujan sedang hingga tinggi atau lebat. Hal ini tampak pada sebaran titik yang mulai menjauh dari garis ideal pada hujan >50 mm, di mana radar terkadang membaca lebih tinggi atau lebih rendah dari AWS. Sebaran titik yang dominan di dekat garis ideal pada hujan ringan hingga sedang (<50 mm) menunjukkan kecocokan yang cukup baik antara radar dengan AWS dan ARG.

Namun, beberapa *outlier*, seperti titik yang berada jauh di atas garis, menunjukkan adanya kejadian hujan ekstrem atau anomali pengukuran yang dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti atenuasi sinyal radar, gangguan *clutter*, atau efek topografi pesisir yang memengaruhi kualitas pengamatan. Secara keseluruhan, hasil ini memperlihatkan bahwa radar cuaca C-Band dapat menjadi alat pemantauan hujan yang akurat di kawasan pesisir. Kombinasi radar dan data pengamatan lapangan tetap diperlukan untuk meminimalisasi kesalahan estimasi dan meningkatkan akurasi analisis hidrometeorologi.

Grafik *scatter plot* pada Gambar 4. memperlihatkan hubungan antara data curah hujan hasil pengamatan AWS dan ARG (sumbu X) dengan estimasi curah hujan dari produk satelit GSMaP (*Global*

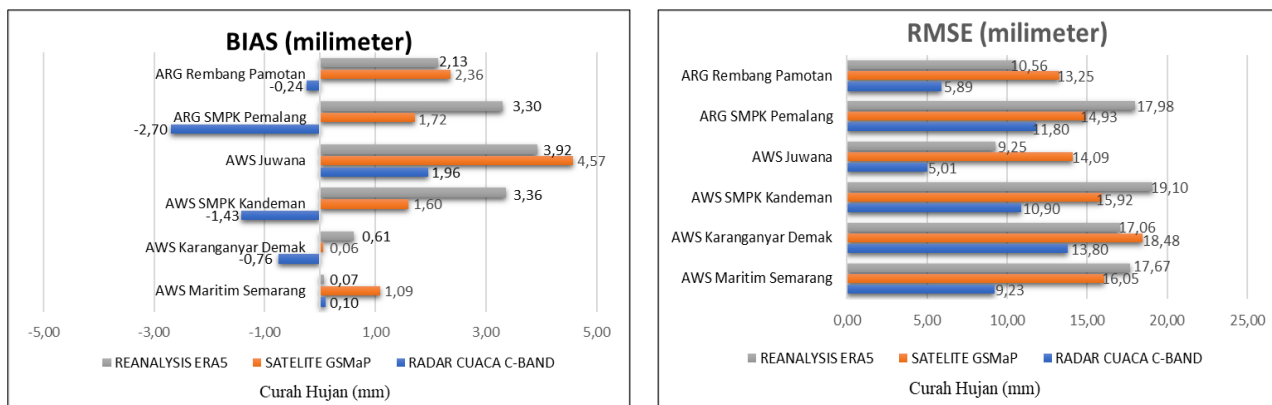
Satellite Mapping of Precipitation) (sumbu Y). Garis putus-putus diagonal pada grafik menunjukkan garis identitas (1:1 line), yaitu posisi ideal apabila nilai curah hujan dari AWS sama persis dengan hasil estimasi GSMaP. Secara umum, titik-titik sebar pada grafik menunjukkan adanya korelasi positif antara data AWS dan GSMaP. Artinya, ketika AWS mencatat curah hujan yang lebih tinggi, GSMaP juga cenderung memperlihatkan nilai estimasi hujan yang lebih tinggi. Namun demikian, sebaran titik yang cukup menyimpang dari garis 1:1 mengindikasikan bahwa GSMaP belum sepenuhnya mampu merepresentasikan kondisi curah hujan aktual di lokasi AWS dan ARG secara akurat.

GSMaP cenderung memberikan estimasi curah hujan yang lebih tinggi dibandingkan hasil pengamatan AWS. Dengan kata lain, GSMaP memiliki kecenderungan overestimasi. Hal ini dapat disebabkan oleh keterbatasan algoritma GSMaP dalam mengoreksi efek awan tipis, resolusi spasial yang lebih kasar dibandingkan pengamatan titik AWS, atau pengaruh topografi dan kondisi atmosfer lokal di sekitar Semarang yang tidak sepenuhnya tertangkap oleh sistem satelit. Temuan ini sejalan dengan penelitian Fatkhuroyan *et al.* (2018) yang menyatakan bahwa produk GSMaP masih memiliki ketidakpastian dan kecenderungan bias pada wilayah tropis maritim seperti Indonesia. Selain itu, diperoleh pula nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar yang relatif cukup besar, yang menunjukkan adanya penyimpangan atau error estimasi yang signifikan antara kedua sumber data. Kesalahan ini lebih terlihat pada peristiwa hujan dengan intensitas lebat (>50 mm), di mana GSMaP seringkali memberikan nilai yang jauh lebih besar daripada hasil pengamatan AWS dan ARG.

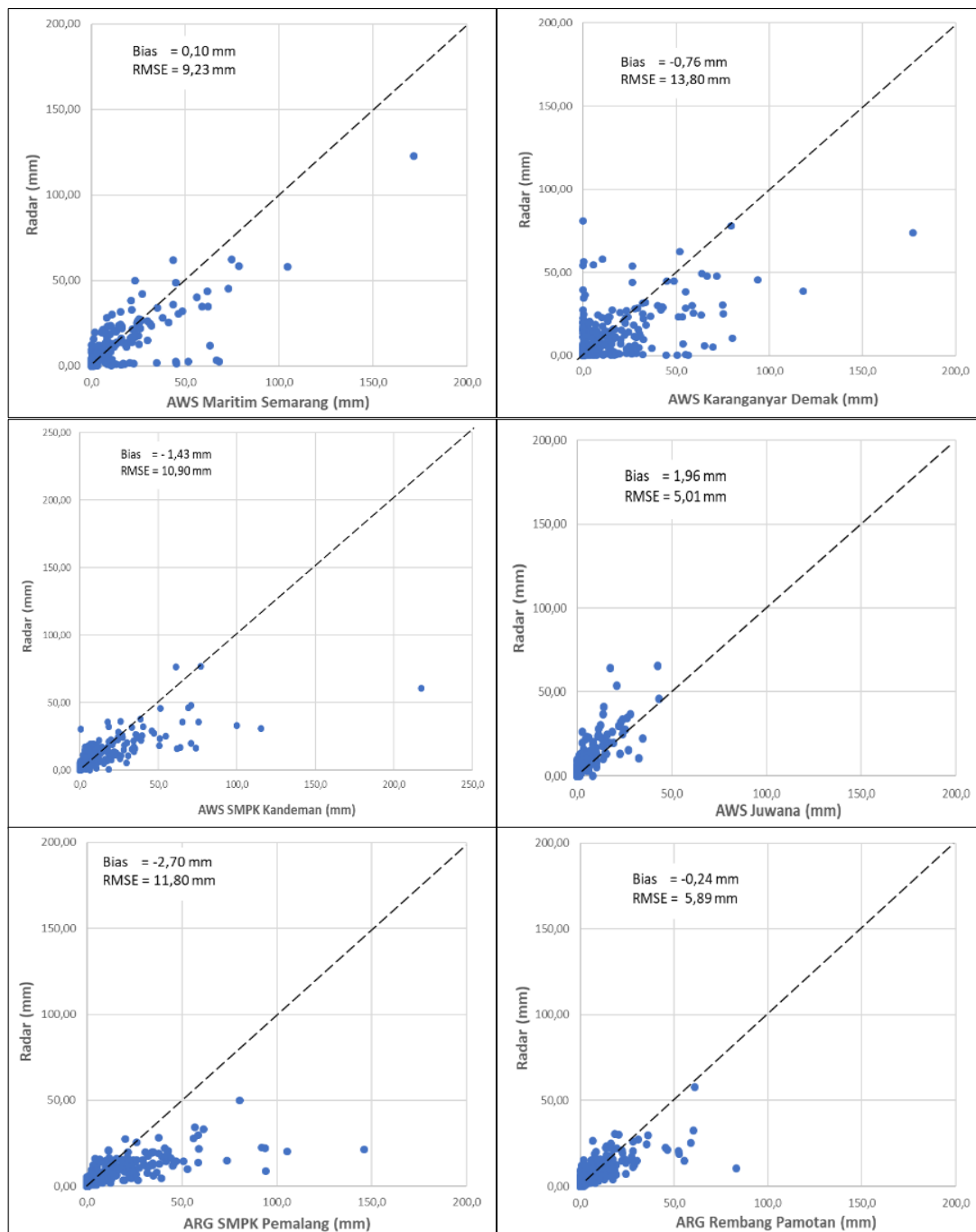
Fenomena ini tampak pada titik-titik yang berada jauh di atas garis 1:1. Sebagian besar titik pada grafik memang terkonsentrasi pada rentang curah hujan ringan hingga sedang (0–50 mm), baik pada data AWS dan ARG maupun GSMaP. Hal ini konsisten dengan karakteristik hujan di wilayah pesisir Utara Jawa Tengah yang umumnya lebih sering didominasi oleh hujan dengan intensitas rendah hingga sedang (Siswanto., *et al.* 2016).

Tabel 1. Perbandingan Harian Akurasi Data Curah Hujan dari Radar C-Band, Satelit GSMaP dan ERA 5

Nama Alat Curah Hujan	Radar Cuaca C-BAND (milimeter)		Satelite GSMaP (milimeter)		Reanalysis Data ERA5 (milimeter)	
	Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE
AWS Maritim Semarang	0,10	9,23	1,09	16,05	0,07	17,67
AWS Karanganyar Demak	-0,76	13,80	0,06	18,48	0,61	17,06
AWS SMPK Kandeman	-1,43	10,90	1,60	15,92	3,36	19,10
AWS Juwana	1,96	5,01	4,57	14,09	3,92	9,25
ARG SMPK Pemalang	-2,70	11,80	1,72	14,93	3,30	17,98
ARG Rembang Pamotan	-0,24	5,89	2,36	13,25	2,13	10,56

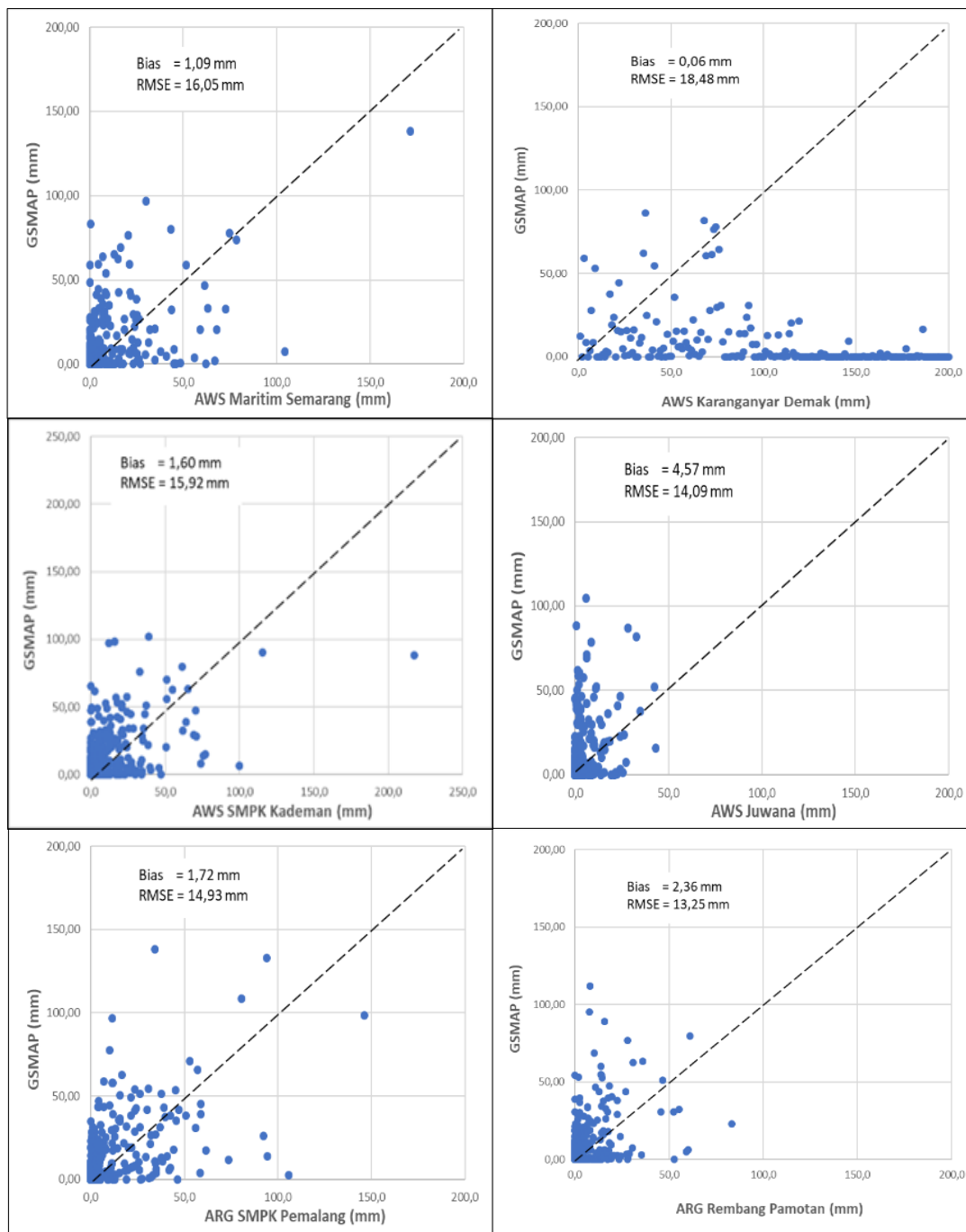


Gambar 2. Perbandingan Harian Bias dan RMSE dari Radar Cuaca C-Band, Satelit GSMaP dan ERA5



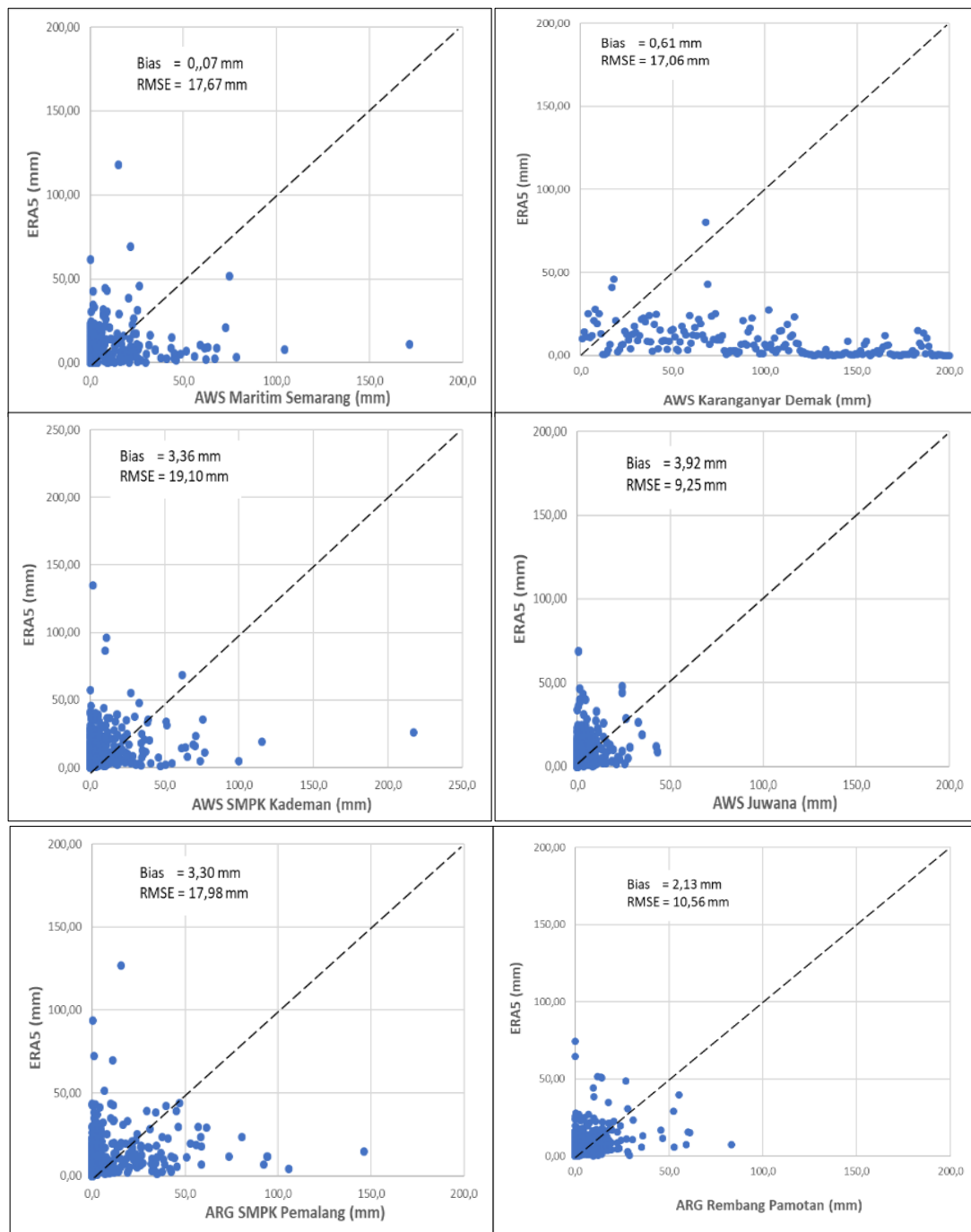
Gambar 3. Scatter plot Data Radar Cuaca C-Band dengan Data Aktual AWS dan ARG

Namun, adanya beberapa outlier dengan nilai ekstrem menunjukkan bahwa GSMaP mampu mendeteksi hujan lebat yang tidak sepenuhnya terkonfirmasi oleh data AWS pada beberapa waktu terlihat pada gambar 4 yaitu AWS SMPK Pemalang, AWS Juwana dan ARG Rembang Pamotan. Kondisi ini dipengaruhi oleh luas cakupan piksel satelit yang lebih besar daripada cakupan alat AWS dan ARG, sehingga perbedaan spasial dan temporal dapat memunculkan ketidaksesuaian data. Secara keseluruhan, meskipun GSMaP menunjukkan hubungan positif dengan data AWS, kualitas estimasi curah hujan dari satelit ini masih perlu dikoreksi sebelum digunakan dalam analisis hidrometeorologi. Penggunaan metode koreksi bias (bias correction) atau kalibrasi dengan data pengamatan di lapangan (AWS dan ARG) sangat disarankan agar hasil GSMaP dapat lebih representatif.



Gambar 4. Scatter plot Data Satelit Cuaca GSMaP dengan Data Aktual AWS dan ARG

Secara umum seluruh stasiun menunjukkan pola yang konsisten. Sebagian besar titik data berada di bawah garis 1:1 terutama pada intensitas hujan sedang hingga lebat. Hal ini menunjukkan bahwa ERA5 memiliki kecenderungan *underestimated* terhadap curah hujan intensitas tinggi. Sebaliknya, pada hujan ringan (< 20 mm) titik data relatif lebih dekat terhadap garis kesetaraan sehingga kesalahan lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa ERA5 mampu merepresentasikan kejadian hujan, namun kurang mampu merepresentasikan besarnya intensitas hujan pada skala lokal. Kesalahan semakin meningkat seiring bertambahnya intensitas hujan seperti terlihat pada gambar 5 yaitu AWS Juwana. Kondisi tersebut merupakan karakteristik umum model global di wilayah tropis maritim dimana hujan didominasi oleh proses konveksi lokal berskala *mesoscale* yang tidak sepenuhnya tertangkap oleh resolusi grid reanalisis.

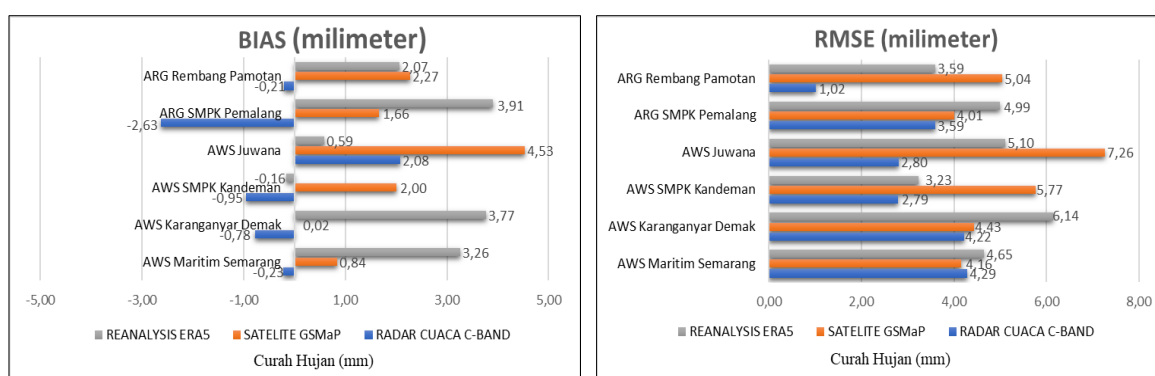


Gambar 5. Scatter plot Data Reanalisis ERA5 dengan Data Aktual AWS dan ARG

Hasil perbandingan bulanan akurasi curah hujan antara data pengamatan lapangan (AWS dan ARG) dengan data hujan Radar Cuaca C-Band, Satelit GSMaP dan data Reanalisis ERA5 menunjukkan variasi performa yang cukup beragam pada tiap lokasi dan bulan. Secara umum, nilai bias dan RMSE yang ditampilkan pada tabel memperlihatkan kecenderungan bahwa Radar C-Band memiliki akurasi yang lebih baik dibandingkan Satelit GSMaP dan data Reanalisis ERA5, baik dilihat dari besarnya bias maupun kestabilan nilai RMSE. Secara keseluruhan, hasil validasi ini memperlihatkan bahwa Radar Cuaca C-Band lebih akurat dan stabil dibandingkan Satelit GSMaP dan data Reanalisis ERA5 dalam memperkirakan curah hujan lokal. Satelit GSMaP dan data Reanalisis ERA5 cenderung menunjukkan overestimasi pada sebagian

Tabel 2. Perbandingan Bulanan Akurasi Data Curah Hujan dari Radar C-Band, Satelit GSMaP dan ERA 5

Nama Alat Curah Hujan	Radar Cuaca C-BAND (milimeter)		Satelite GSMaP (milimeter)		Reanalysis Data ERA5 (milimeter)	
	Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE
AWS Maritim Semarang	-0,23	4,29	0,84	4,16	3,26	4,65
AWS Karanganyar Demak	-0,78	4,22	0,02	4,43	3,77	6,14
AWS SMPK Kandeman	-0,95	2,79	2,00	5,77	-0,16	3,23
AWS Juwana	2,08	2,80	4,53	7,26	0,59	5,10
ARG SMPK Pemalang	-2,63	3,59	1,66	4,01	3,91	4,99
ARG Rembang Pamotan	-0,21	1,02	2,27	5,04	2,07	3,59



Gambar 6. Perbandingan Bulanan Bias dan RMSE dari Radar Cuaca C-Band, Satelit GSMaP dan ERA5

besar lokasi, khususnya pada periode Muson Barat yang umumnya berlangsung pada bulan Desember–Maret. Pada periode tersebut, curah hujan di wilayah Indonesia cenderung meningkat akibat dominasi angin baratan yang membawa massa udara lembap dari Samudra Hindia dan Laut Cina Selatan menuju wilayah Indonesia.

Kondisi atmosfer yang lebih lembap selama Muson Barat mendukung pertumbuhan awan konvektif dan sistem hujan skala mesoskal sehingga frekuensi serta intensitas hujan menjadi lebih tinggi dibanding musim lainnya. Aktivitas konvektif yang meningkat pada periode ini menyebabkan estimasi hujan berbasis satelit dan reanalisis sering mengalami overestimasi karena kompleksitas awan hujan tropis yang sulit direpresentasikan secara akurat oleh algoritma satelit maupun model numerik atmosfer. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang menunjukkan bahwa periode musim hujan di Indonesia berkaitan erat dengan aktivitas konveksi tropis, *Mesoscale Convective Complex* (MCC), dan penguatan sirkulasi monsun yang meningkatkan intensitas curah hujan di wilayah Indonesia (Septiadi., *et al*, 2020). Namun demikian, GSMaP lebih baik dari data Reanalisis ERA 5 dan memiliki potensi sebagai sumber data alternatif karena ketersediaannya yang luas secara spasial dan temporal. Akan tetapi, penggunaannya untuk analisis hidrometeorologi tetap memerlukan koreksi bias atau kalibrasi data dengan data lapangan (AWS dan ARG) agar hasilnya lebih representatif dan akurat.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa performa akurasi terbaik dalam merepresentasikan curah hujan di wilayah pesisir Utara Jawa Tengah, baik pada skala harian maupun bulanan adalah radar cuaca C-Band, diikuti GSMaP, kemudian ERA5. Radar C-Band memiliki bias dan RMSE paling rendah karena mampu mengamati hujan secara langsung dengan resolusi tinggi sehingga lebih representatif terhadap hujan lokal. GSMaP masih cukup baik, namun dipengaruhi keterbatasan algoritma satelit pada awan konvektif tropis, sedangkan ERA5

memiliki error lebih besar karena berbasis model numerik dengan resolusi lebih kasar. Radar C-Band lebih direkomendasikan untuk analisis jangka pendek seperti *nowcasting* dan pemantauan hujan ekstrem, sedangkan GSMaP dan ERA5 lebih sesuai untuk analisis jangka panjang karena memiliki data historis yang lebih panjang dan kontinu.

DAFTAR PUSTAKA

- Akhirianto, N. A., Wardani, K. S., Ma'rufatin, A., Nurwijayanti, A., Putra, F. M. G., & Chusnayah, F. 2025. Sustainable Regional Development Planning Based on Coastal Disaster Risk Assessment (Case Study: North Coast of Central Java). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1479(1): 012040.
- Alex, P., Lalaji, K., & Mishra, D. 2025. A Machine Learning Approach to Rainfall Estimation in Tropical Coastal Regions Using Doppler Radar and ERA5 Reanalysis Data. *Proceedings of the 2025 IEEE Asia-Pacific Conference on Geoscience, Electronics and Remote Sensing Technology (AGERS)*.
- Ananda, N., Hartanto, H., & Kurniadi, D. 2023. Preliminary Evaluation of Weather Radar Rainfall Estimation in Bandung City. *Proceedings of the 8th International Conference on Instrumentation, Control, and Automation (ICA)*, 76-80.
- Camporeale, E. 2021. RMSE is Not Enough: Guidelines to Robust Data-Model Comparisons for Magnetospheric Physics. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 214: 105547.
- Fatkhuroyan, F., Atikah, T. A., Sopaheluwakan, A., & Permana, D. S. 2018. Validation of Satellite Daily Rainfall Estimates Over Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1011: 012039.
- Fitria, S. 2016. Teknik Interpretasi dan Analisa Citra Radar untuk Pemberian Informasi yang Lebih Baik. *Prosiding Workshop Operasional Radar Cuaca*, 1.
- Hans Hersbach, Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., et al. 2020. The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730): 1999-2049.
- Hodson, T. O. 2022. Root-Mean-Square Error (RMSE) or Mean Absolute Error (MAE): When to Use Them or Not. *Geoscientific Model Development*, 15: 5481-5487.
- Hutapea, T. D., Permana, D. S., Praja, A. S., & Muzayanah, L. F. 2021. Modifikasi Konstanta Persamaan ZR Radar Surabaya untuk Peningkatan Akurasi Estimasi Curah Hujan. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 21(2): 91-97.
- Kim, Y., Kim, D., Park, J., & Jun, C. 2024. An Effective Algorithm of Outlier Correction in Space-Time Radar Rainfall Data Based on the Iterative Localized Analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 1-16.
- Manurung, R. M., & Matondang, A. C. 2016. Pemanfaatan Data Satelit dan Radar dalam Analisis Intensitas Hujan di Wilayah Medan (Studi Kasus 7-8 Februari 2016). *Prosiding Workshop Operasional Radar Cuaca 2016*.
- Marengo, J. A., Camarinha, P. I., Alves, L. M., Diniz, F., & Betts, R. A. 2021. Extreme Rainfall and Hydro-Geo Meteorological Disaster Risk in 1.5, 2.0, and 4.0°C Global Warming Scenarios: An Analysis for Brazil. *Frontiers in Climate*, 3: 610433.
- Masaki, T., Iguchi, T., Kanemaru, K., Furukawa, K., Yoshida, N., Kubota, T., & Oki, R. 2022. Calibration of the Dual-Frequency Precipitation Radar Onboard the Global Precipitation Measurement Core Observatory. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 1-16.
- Mulya, A., & Lestari, A. B. 2022. Pengaruh Penerapan Quality Control Data Radar terhadap Akurasi Estimasi Curah Hujan di Wilayah Pontianak dan Sekitarnya. *Jurnal Fisika dan Terapannya*, 9(2): 99-110.
- Naufal, A., Mukhlis, F., Wicaksana, H. S., & Budiawan, I. 2024. Evaluasi Spasial Estimasi Curah Hujan pada Radar Cuaca Menggunakan Metode Z-R Marshall-Palmer di Wilayah Jawa Barat. *Jurnal Otomasi Kontrol dan Instrumentasi*, 16(1): 1.
- Prasetyo, B., Pusparini, N., Irwandi, I., & Fitria, W. 2020. Aplikasi Radar Cuaca untuk Identifikasi Fluktuasi Kondisi Cuaca Ekstrim. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 16(3): 133.
- Qiu, J., Wang, B., & Zhou, C. 2020. Forecasting Stock Prices with Long-Short Term Memory Neural Network Based on Attention Mechanism. *PLoS ONE*, 15(1): e0227222.
- Raoult, B., Bergeron, C., Alós, A. L., Thépaut, J. N., & Dee, D. 2017. Climate Service Develops User-Friendly Data Store. *ECMWF Newsletter*, 151: 22-27. <https://doi.org/10.21957/p3c285>
- Septiadi, D., & Septiadi, Y. N. 2020. Identifikasi Mesoscale Convective Complex (MCC) dan Dampaknya

- terhadap Curah Hujan di Benua Maritim Indonesia (BMI) Sepanjang Tahun 2018. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 20(2): 73-80.
- Sharma, J., Rastogi, A., Verma, S., Kumar, G., & Choudhary, A. 2025. Assessing the Accuracy of Different Z-R Relationships for Doppler Weather Radar Based Rainfall Estimation: A Comparative Study for the Delhi Region. *Physics and Chemistry of the Earth*, 141: 104182.
- Siswanto, S., van Oldenborgh, G. J., van der Schrier, G., Jilderda, R., & van den Hurk, B. 2016. Temperature, Extreme Precipitation, and Diurnal Rainfall Changes in the Urbanized Jakarta City During the Past 130 Years. *International Journal of Climatology*, 36(9): 3207-3225.
- Tahir, W. M. A., Mohd Ariffin, J., Abdullah, Z., Ibrahim, S., Ramli, S., Mohd Deni, H., Hassan, L., Mohd Sidek, Y., River, W., Sang, D. J., Yik, N. K., & Chang. 2022. Mean Field Bias Correction to Radar QPE as Input to Flood Modeling for Malaysian Basins. *International Journal of Integrated Engineering*, 14(5): 168-177. <https://doi.org/10.30880/ijie.2022.14.05.019>
- Utomo, W. S., Purnamasari, R., & Saidah, S. 2019. Analisis Sinyal Radar Cuaca Menggunakan Discrete Cosine Transform. *Proceedings of Engineering*, 6(1).
- World Meteorological Organization (WMO). 2018. *Guide to Climatological Practices (WMO-No. 100)*. Geneva: World Meteorological Organization.
- Yamaji, M., & Kubota, T. 2023. Accuracy Assessment of Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) by Small Precipitation Radar Constellation. *Journal of Earth and Space Applications*, 1: 61.
- Zheng, S., Han, C. J., Huo, C., Cai, W., Zhang, Y., Li, P., Zhang, G., Ji, B., & Zhou, J. 2021. Research on Rainfall Monitoring Based on E-Band Millimeter Wave Link in East China. *Sensors*, 21(5): 1670. <https://doi.org/10.3390/s21051670>