

Evaluasi Spasial Estimasi Curah Hujan pada Radar Cuaca Menggunakan Metode Z-R Marshall-Palmer di Wilayah Jawa Barat

Spatial Evaluation of Estimation Rainfall on Weather Radar Using Marshall-Palmer Z-R Method in West Java

^{1,2}Naufal Ananda*), ³Faqihza Mukhlis, ^{1,2}Haryas Subyantara Wicaksana, ⁴Irvan Budiawan

¹Program Studi Magister Instrumentasi dan Kontrol, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung

²Balai Besar Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Wilayah II, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika

³Kelompok Keahlian Fisika Teknik, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung

⁴Program Doktor Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung

*) *corresponding email: naufal.ananda@bmk.go.id*

Abstrak

Curah hujan merupakan salah satu parameter cuaca yang berpengaruh terhadap berbagai sektor. Intensitas curah hujan tinggi dapat memicu terjadinya bencana hidrometeorologi sehingga data pengamatan curah hujan sangat penting untuk memantau kondisi curah hujan di suatu wilayah. Peralatan curah hujan otomatis merupakan instrumen mengukur curah hujan di suatu titik pengamatan, namun peralatan tersebut memiliki cakupan yang cukup rendah dan belum menjangkau seluruh wilayah. Radar cuaca merupakan salah satu instrumen penginderaan jauh yang mampu mengestimasi curah hujan secara spasial. Output data pengamatan radar cuaca dapat dijadikan estimasi curah hujan menggunakan metode pendekatan Z-R Marshall-Palmer. Penerapan metode tersebut dapat menjadi alternatif untuk wilayah yang belum memiliki peralatan pengamatan curah hujan. Namun, estimasi tersebut perlu dievaluasi sehingga dapat meningkatkan performa akurasi nilai estimasi tersebut. Berdasarkan evaluasi yang telah dilakukan, koefisien determinan tertinggi sebesar 0,92 dan terendah sebesar 0,67. Nilai RMSE terendah sebesar 2.40 dan tertinggi sebesar 6.76, nilai ME tertinggi sebesar 16.59 dan terendah 5.93, bias tertinggi sebesar 12,90 dan terendah 5.30. Hasil studi menunjukkan radar cuaca dapat beroperasi sesuai spesifikasi jarak maksimal pengamatan hingga 220 KM, namun semakin jauh jarak pengamatan terhadap suatu titik, mempengaruhi performa akurasi estimasi curah hujan.

Kata Kunci: Curah Hujan, Radar Cuaca, Reflektivitas, Z-R Marshall-Palmer.

Abstract

Rainfall is one of the weather parameters that affect various sectors. High rainfall intensity can trigger hydrometeorological disasters, so rainfall observation data is vital to monitor rainfall conditions in an area. An automatic rain gauge is an instrument that measures rainfall at an observation point, but the instrument has reasonably low coverage and has yet to reach the entire region. Weather radar is a remote sensing instrument capable of spatially estimating rainfall. Weather radar data can be used to estimate rainfall using the Marshall-Palmer Z-R method. The application of the method can be an alternative for areas that do not have rainfall observation equipment. However, the estimation needs to be evaluated to improve the accuracy of the estimation value. Based on the evaluation, the highest coefficient of determination was 0.92, and the lowest was 0.67. The lowest RMSE value was 2.40, the highest was 6.76, the highest ME value was 16.59, and the lowest was 5.93; the highest bias was 12.90, and the lowest was 5.30. The study results show that the weather radar can operate according to the specifications of the maximum observation distance of up to 220 KM, but the farther the observation distance to a point, the higher the performance of rainfall estimation accuracy.

Keywords: Rainfall, Weather Radar, Reflectivity, Z-R Marshall Palmer.

Makalah diterima 21 Maret 2024 – makalah direvisi 16 April 2024 – disetujui 30 April 2024

Karya ini adalah naskah akses terbuka dengan lisensi [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).



Pendahuluan

Curah hujan merupakan salah satu parameter cuaca yang berpengaruh terhadap berbagai sektor, seperti sektor pertanian untuk kebutuhan irigasi sawah dan sektor kebencanaan. Intensitas curah hujan tinggi dapat memicu bencana hidrometeorologi seperti banjir dan tanah longsor [1], serta rendahnya intensitas curah hujan mengakibatkan bencana kekeringan [2]. Wilayah Pulau Jawa termasuk Jawa Barat merupakan salah satu wilayah rawan terjadi bencana alam yang dipicu oleh parameter curah hujan [3]. Oleh karena itu, pemantauan

dan pengamatan curah hujan akurat dengan resolusi temporal dan spasial tinggi, penting untuk dilakukan dalam rangka pencegahan dan mitigasi bencana hidrometeorologi [4].

Penakar hujan otomatis seperti *Automatic Rain Gauge* (ARG) 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 [5]. Pengukuran curah hujan secara spasial melalui penginderaan jauh seperti radar cuaca menjadi salah satu alternatif dalam estimasi curah hujan. Prinsip kerja radar cuaca adalah memancarkan gelombang elektromagnetik pada objek di atmosfer seperti awan, presipitasi dan lain sebagainya, kemudian menerima kembali gelombang yang dipancarkan. Namun, beberapa kejadian objek yang dideteksi radar cuaca bukan fenomena atmosfer, melainkan seperti gunung, bangunan dan pesawat. Hal ini menjadi kelemahan dari pengamatan radar cuaca, sehingga menimbulkan bias pada pengukuran [6].

Radar cuaca mempunyai kelebihan dalam resolusi spasial dan temporal tinggi [7], sehingga dapat menjangkau area yang belum memiliki jaringan peralatan curah hujan. Curah hujan dapat diestimasi menggunakan output pengamatan radar yaitu Reflektivitas (Z). Reflektivitas dapat diolah menjadi estimasi curah hujan menggunakan metode Z-R, yaitu pendekatan hubungan empiris antara Z (Reflektivitas) dan R (*Rain Rate*). Namun, metode estimasi tersebut perlu dievaluasi terhadap peralatan curah hujan [8].

Penelitian yang dilakukan oleh Ahmad Kosasih dkk [9] pada studi kasus estimasi curah hujan di Jawa Timur menunjukkan adanya ketidakpastian pada hasil akurasi, salah satunya faktor atenuasi. Penelitian tersebut melakukan evaluasi koreksi data atenuasi pada data reflektivitas radar cuaca terhadap perhitungan estimasi curah hujan di Sidoarjo, serta pemilihan nilai koreksi untuk perbaikan kualitas estimasi curah hujan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan nilai koreksi terhadap *raw data* reflektivitas mampu memberikan peningkatan akurasi estimasi curah hujan di mana pada estimasi curah hujan dari radar cuaca tanpa dilakukan koreksi menghasilkan nilai akurasi 70,8% dan setelah penerapan koefisien koreksi akurasi mengalami peningkatan 72,5% hingga 86,9% [9].

Penelitian yang dilakukan oleh Liki Ardiyanto dkk [10] meneliti terkait estimasi curah hujan menggunakan hubungan Z-R untuk awan hujan konvektif dan stratiform di Lampung. Awan hujan stratiform adalah awan yang menyebabkan hujan kontinu. Studi tersebut menilai penerapan estimasi curah hujan menggunakan Z-R tergantung pada tipe awan hujan. Berdasarkan hasil penelitian tersebut menunjukkan Z-R Marshall-Palmer paling representatif untuk awan stratiform.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian berfokus pada analisis penerapan pendekatan Z-R Marshall-Palmer pada awan hujan stratiform dalam mengestimasi curah hujan. Radar cuaca yang digunakan pada penelitian ini menggunakan frekuensi 5.6 GHz dan jarak maksimum pengamatan hingga 220 km [11]. Jangkauan pengamatan radar cuaca tersebut dapat menjangkau area yang belum memiliki peralatan curah hujan otomatis. Studi ini menganalisis performa dan akurasi hasil estimasi curah hujan berdasarkan jarak maksimum jangkauan pengamatan radar.

Metode Penelitian

Data yang digunakan pada penelitian adalah data curah hujan harian selama periode 1 Desember 2022 hingga 28 Februari 2023. Pemilihan waktu didasarkan pada periode musim hujan di Indonesia [12]. ARG yang digunakan pada penelitian ini sebanyak 5 titik yang tersebar di wilayah Jawa Barat, yaitu ARG Rengasdengklok, ARG Sukaraja, ARG Cimahi, ARG Pusaka Negara, dan ARG Kertajati. Tabel 1 menunjukkan lokasi dan jarak peralatan ARG terhadap radar cuaca.

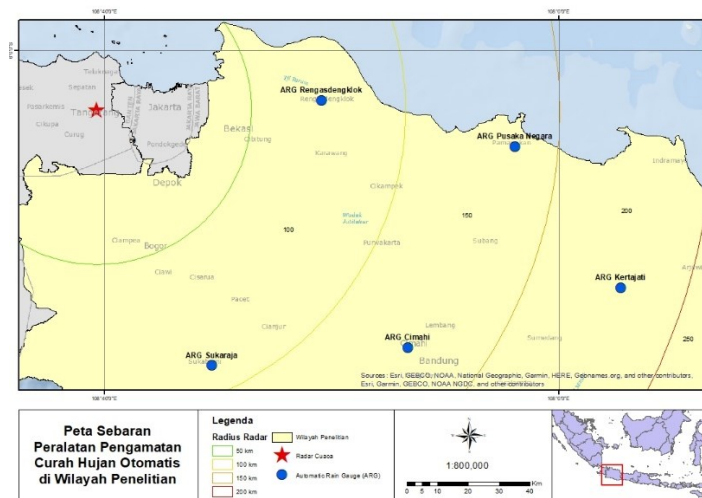
Tabel 1. Lokasi ARG dan jarak terhadap radar cuaca

Nama ARG	Latitude	Longitude	Jarak (Km)
ARG Rengasdengklok	-6,146	107,303	73
ARG Sukaraja	-6,921	106,981	91
ARG Cimahi	-6,869	107,556	127
ARG Pusaka Negara	-6,281	107,869	136
ARG Kertajati	-6,693	108,180	179

Radar Cuaca yang digunakan yaitu Radar Cuaca C-Band yang terletak pada lokasi koordinat -6.1669°S dan -106,6502. Tabel 2 menunjukkan spesifikasi radar cuaca yang digunakan dan Gambar 1 menunjukkan peta sebaran lokasi peralatan yang digunakan pada penelitian.

Tabel 2. Spesifikasi radar cuaca [11]

Parameter	Ukuran
Polarisasi	Single
Tipe Transmitter	Coaxial Magnetron
Frekuensi yang digunakan	5,6 GHz
Tinggi Tower	20 m
Altitude	10 m
PRF	600 Hz
Jangkauan Maksimum	220 Km



Gambar 1. Peta lokasi radar cuaca dan sebaran lokasi titik ARG di wilayah penelitian

Output data citra radar adalah dalam bentuk format data volumetric (.vol), di mana pada format tersebut terdapat 3 data utama yaitu Reflektivitas (Z), Arah Kecepatan Objek (V) dan Pergerakan Hydrometeor (W). Penelitian ini menggunakan data reflektivitas, dimana tahap pengolahan data reflektivitas menggunakan perangkat lunak Wradlib dan Py-ART berbasis python. Wradlib dan Py-ART merupakan *library* yang digunakan untuk pengolahan spasial seperti data radar [13]. Tahapan penelitian dilakukan yaitu melakukan *pre-processing raw data* radar dalam format .vol untuk dikonversi dalam bentuk NetCDF (.nc). Data tersebut kemudian diolah menggunakan metode pendekatan Z-R Marshall-Palmer sehingga menghasilkan nilai estimasi curah hujan [14].

Metode pendekatan Z-R dengan persamaan sebagai berikut:

$$Z = aR^b \quad (1)$$

Z didefinisikan sebagai reflektivitas dari pengamatan radar (mm^6/mm^3), 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 [15].

Reflektivitas radar (Z) diukur dalam satuan desibel (dB) melalui persamaan [15]:

$$\text{dBZ} = 10 \log_{10}(Z) \quad (2)$$

Pada penelitian ini menggunakan metode pendekatan Z-R Marshall-Palmer, dengan persamaan matematis sebagai berikut [16]:

$$Z = 200R^{1,6} \quad (3)$$

Radar cuaca secara kontinu melakukan pengamatan setiap 10 menit, sedangkan peralatan curah hujan melakukan pengukuran curah hujan secara akumulatif tiap jam [15]. 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. CH_{radar} adalah estimasi curah hujan dari citra radar menggunakan Z-R Marshall-Palmer, and CH_{gauge} adalah pengukuran curah hujan di lokasi ARG. Parameter evaluasi yang digunakan pada penelitian ini menggunakan analisis statistik berupa bias, korelasi (R), *Mean Error* (ME), dan *Root Mean Square Error* (RMSE). Adapun persamaan matematis dari parameter evaluasi tersebut sebagai berikut:

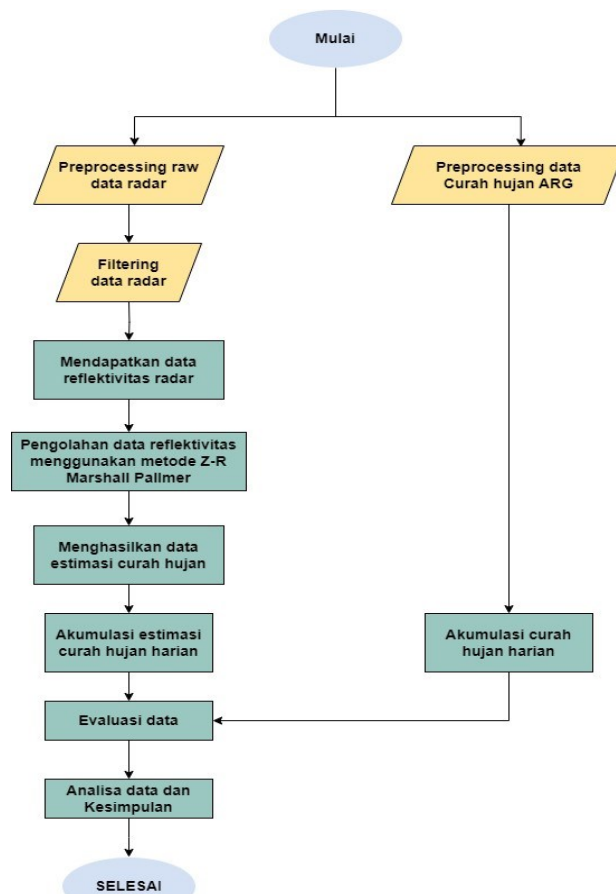
$$B(x) = \frac{\sum_{i=1}^n CH_{gauge}(x_i)}{\sum_{i=1}^n CH_{radar}(x_i)} \quad (4)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (CH_{radar} - \overline{CH_{radar}})(CH_{gauge} - \overline{CH_{gauge}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (CH_{radar} - \overline{CH_{radar}})^2 * (CH_{gauge} - \overline{CH_{gauge}})^2}} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (CH_{radar} - CH_{gauge})^2} \quad (6)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (CH_{radar} - CH_{gauge}) \quad (7)$$

Gambar 3 menunjukkan diagram alir penelitian secara keseluruhan. Evaluasi dilakukan pada 5 titik pengamatan peralatan curah hujan di wilayah Jawa Barat. Parameter Evaluasi terdiri dari yaitu Korelasi untuk menunjukkan hubungan antara nilai estimasi curah hujan terhadap curah hujan yang diukur oleh ARG, *Mean Error* (ME) untuk menunjukkan rata-rata selisih antara data uji terhadap data standar dan *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk mengetahui penyimpangan yang terjadi antara data uji terhadap data standar.

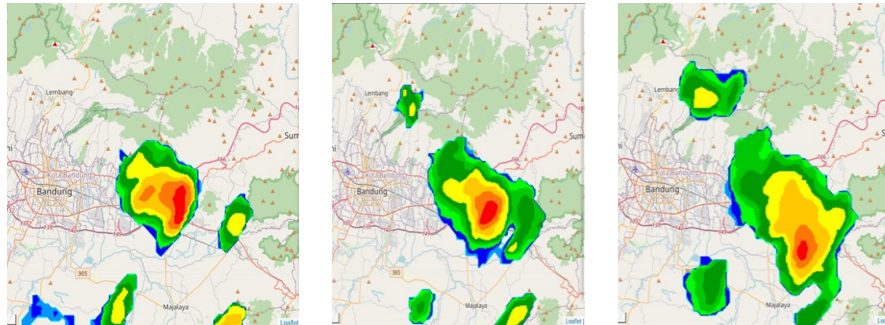


Gambar 2. Diagram alir penelitian

Hasil evaluasi akan menunjukkan akurasi pengukuran radar, analisis spasial jangkauan pengamatan radar dan dapat dijadikan alternatif ketersediaan data hujan pada wilayah yang belum memiliki peralatan pengamatan. Evaluasi dilakukan dalam skala harian untuk mendapatkan nilai curah hujan maksimum pada ARG.

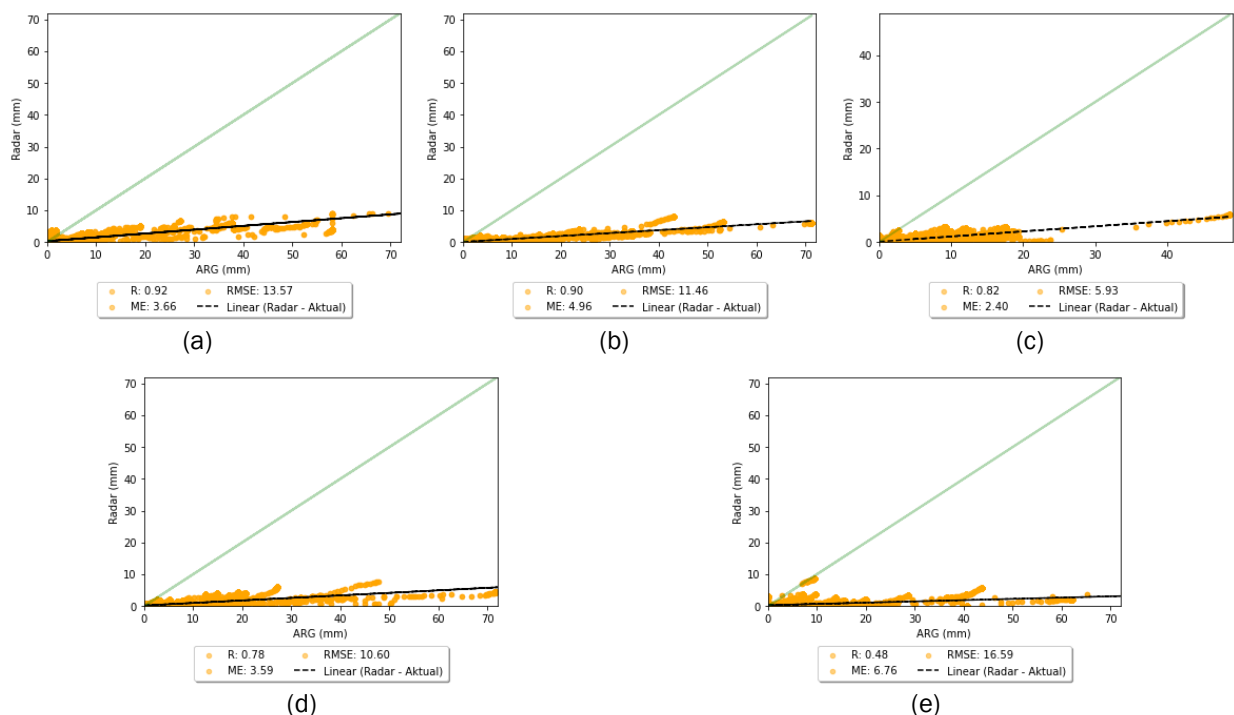
Hasil dan Diskusi

Gambar 4 merupakan representasi hasil pengolahan citra pengamatan radar cuaca pada suatu wilayah. Citra pengamatan radar cuaca difilter untuk memperoleh variabel reflektifitas yang merepresentasikan intensitas curah hujan [17].



Gambar 3. Sampel citra radar cuaca

Gambar 5 merupakan evaluasi nilai estimasi curah hujan menggunakan metode pendekatan Z-R Marshall-Palmer terhadap hasil pengukuran curah hujan di 5 titik peralatan pengamatan. Hasil studi menunjukkan bahwa adanya variasi pada parameter koefisien determinan. Nilai koefisien determinan tertinggi sebesar 0.92 pada ARG Rengasdengklok, dan terendah sebesar 0.67 pada ARG Kertajati. Hal ini menunjukkan hasil estimasi curah hujan pada radar cuaca mempunyai korelasi tinggi hingga sedang serta mampu mengikuti pola pengukuran curah hujan aktual. Parameter nilai error ME dan RMSE yang dihasilkan cukup tinggi dan bervariasi di 5 titik pengamatan.

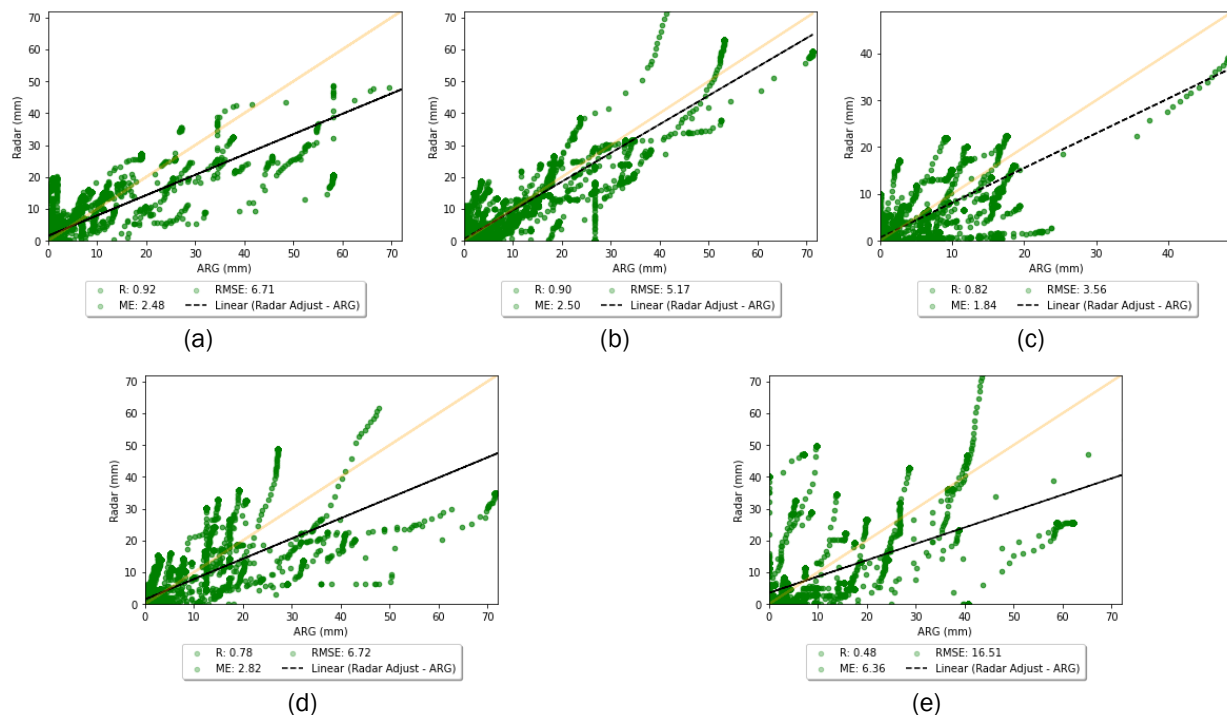


Gambar 4. Evaluasi hasil estimasi curah hujan terhadap data peralatan curah hujan (a) ARG Rengasdengklok; (b) ARG Sukaraja; (c) ARG Cimahi; (d) ARG Pusaka Negara; (e) ARG Kertajati

Secara keseluruhan, Gambar 5 menunjukkan hasil estimasi curah hujan bersifat *underestimate* terhadap curah hujan aktual. Jika titik curah hujan dan regresi (garis warna hitam) yang diplot di grafik berada di bawah sumbu diagonal *scatterplot* (garis hijau transparan), maka estimasi curah hujan bersifat *underestimate* terhadap curah

hujan aktual. Sebaliknya, jika plot curah hujan berada diatas sumbu diagonal, maka estimasi tersebut bersifat overestimate terhadap data curah hujan aktual.

Gambar 6 merupakan evaluasi estimasi curah hujan terkoreksi, yaitu menjumlahkan nilai bias dari estimasi curah hujan radar dengan nilai pengamatan peralatan curah hujan [18]. Hasilnya menunjukkan bahwa adanya pergeseran garis regresi dan peningkatan performa akurasi estimasi setelah *adjusted*. Hal ini dinilai efektif untuk meningkatkan akurasi estimasi curah hujan [19], [20].

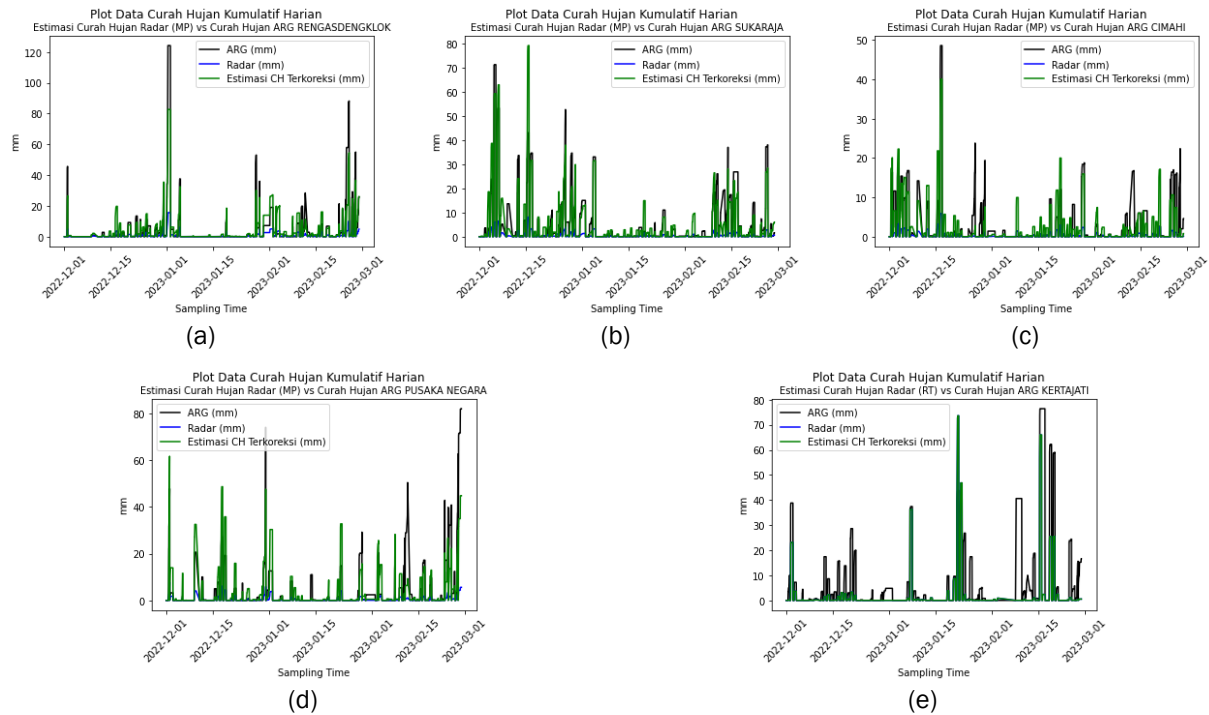


Gambar 5. Hasil penerapan *adjusted* estimasi curah hujan terhadap peralatan curah hujan (a) ARG Rengasdengklok; (b) ARG Sukaraja; (c) ARG Cimahi; (d) ARG Pusaka Negara; (e) ARG Kertajati

Secara keseluruhan, setelah *adjusted* menunjukkan peningkatan akurasi dan performa estimasi curah hujan terhadap data curah hujan aktual. Walaupun adanya peningkatan akurasi dan performa, hasil estimasi tetap masih tergolong *underestimate* terhadap data curah hujan aktual, hal ini dikarenakan mayoritas sebaran data curah hujan dan garis regresi (warna hitam) berada di bawah garis diagonal (warna orange transparan).

Indikasi peningkatan performa dan akurasi estimasi dapat dilihat pada perbandingan Gambar 5 dan 6, adanya penurunan nilai error ME dan RMSE setelah *adjusted* pada Gambar 6. Hal ini berdampak adanya pergeseran garis regresi mendekati dengan garis diagonal (garis warna orange transparan) pada scatterplot, sehingga sebaran data estimasi curah hujan terkoreksi mendekati dengan nilai aktual.

ARG Rengasdengklok *unadjusted* memiliki RMSE dan ME sebesar 3,66 dan 13,57, setelah *adjust* menjadi 2,48 dan 6,71. ARG Sukaraja *unadjusted* RMSE dan ME sebesar 4,96 dan 11,46, setelah *adjust* menjadi 2,50 dan 5,17. ARG Cimahi *unadjusted* RMSE dan ME sebesar 2,40 dan 5,93, setelah *adjust* menjadi 1,84 dan 3,56. ARG Pusaka Negara *unadjusted* RMSE dan ME sebesar 350 dan 10,60, setelah *adjust* menjadi 2,82 dan 6,72. ARG Kertajati *unadjusted* RMSE dan ME sebesar 6,76 dan 16,59, setelah *adjust* menjadi 4,97 dan 12,53. Secara keseluruhan, Hasil ini menunjukkan data estimasi curah hujan terhadap data aktual mempunyai korelasi kuat hingga sedang. Penerapan *adjusted* pada hasil estimasi curah hujan dapat meningkatkan akurasi dan performa estimasi curah hujan [20].



Gambar 6. Plotting grafik estimasi curah hujan, estimasi curah hujan terkoreksi dan peralatan curah hujan

Tabel 3. Hasil evaluasi estimasi curah hujan tanpa bias dan setelah penerapan bias

Nama Peralatan Curah Hujan	Jarak	Evaluasi <i>Unadjusted</i>				Evaluasi <i>Adjusted</i>	
		Bias	R	RMSE	ME	RMSE	ME
ARG Rengasdengklok	73	5,30	0,92	3,66	13,57	2,48	6,71
ARG Sukaraja	91	9,75	0,90	4,96	11,46	2,50	5,17
ARG Cimahi	127	6,79	0,82	2,40	5,93	1,84	3,56
ARG Pusaka Negara	136	8,03	0,78	3,50	10,60	2,82	6,72
ARG Kertajati	179	12,90	0,67	6,76	16,59	4,97	12,53

Tabel 3 menginformasikan jarak ARG terhadap pusat radar cuaca serta hasil evaluasi sebelum dan sesudah *adjusted*. Studi ini melakukan analisis spasial menggunakan ARG berjarak 73 – 179 KM dari pusat radar cuaca. Hasil nya menunjukkan bahwa RMSE terendah sebesar 2.40 dan tertinggi sebesar 6.76, ME tertinggi sebesar 16.59 dan terendah 5.93, bias tertinggi sebesar 12,90 dan terendah 5.30. Hasil studi menunjukkan bahwa faktor jangkauan pengamatan radar cuaca terhadap suatu lokasi, dapat mempengaruhi performa dan akurasi estimasi curah hujan dari radar cuaca [21]. Korelasi tertinggi dan nilai error terendah berada pada lokasi ARG Rengasdengklok, dimana ARG tersebut berjarak 73 KM dari pusat radar. ARG Kertajati dinilai menghasilkan performa terendah, hal ini dilihat dari parameter korelasi terendah dan parameter error tertinggi, ARG Kertajati berada pada jarak terjauh yaitu sebesar 179 KM dari pusat radar. Berdasarkan spesifikasi radar cuaca yang mampu mengukur hingga 220 KM, namun semakin jauh jarak pengamatannya, performa akurasi akan semakin menurun.

Kesimpulan

Evaluasi spasial estimasi curah hujan di wilayah Jawa Barat menggunakan metode pendekatan Z-R Marshall-Palmer telah berhasil dilakukan. Parameter evaluasi yang digunakan pada studi ini yaitu bias, koefisien determinan, RMSE dan ME menunjukkan hasil yang variatif serta penerapan *adjust* pada estimasi curah hujan dapat meningkatkan performa dan akurasi. Pada penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan metode ZR berdasarkan koefisien determinan yang dikembangkan sehingga dapat dimanfaatkan secara optimal untuk wilayah tertentu.

Referensi

- [1] J. A. Marengo, P. I. Camarinha, L. M. Alves, F. Diniz, dan R. A. Betts, "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, 2021. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.610433>.
- [2] M. Yang, Y. Mou, Y. Meng, S. Liu, C. Peng, dan X. Zhou, "Modeling The Effects of Precipitation and Temperature Patterns on Agricultural Drought in China from 1949 to 2015," *Science of The Total Environment*, 711, 135139. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135139>.
- [3] H. Sri Naryanto, F. Prawiradisastra, R. Ardiyanto, dan W. Hidayat, "Analisis Pasca Bencana Tanah Longsor 1 Januari 2020 dan Evaluasi Penataan Kawasan di Kecamatan Sukajaya, Kabupaten Bogor" *Jurnal Geografi Gea*, 20(2), 197–213, 2020. <https://doi.org/10.17509/gea.v20i2.24232>.
- [4] S. Zheng, C. Han, J. Huo, W. Cai, Y. Zhang, P. Li, G. Zhang, B. Ji, J. Zhou, "Research on Rainfall Monitoring Based on E-Band Millimeter Wave Link in East China." 1;21(5):1670, Mar 2021. doi: 10.3390/s21051670. PMID: 33804316; PMCID: PMC7957804.
- [5] J. Qiu, B. Wang, dan C. Zhou, "Forecasting Stock Prices with Long-Short Term Memory Neural Network Based on Attention Mechanism," *PLoS ONE*, 15(1), 2020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227222>.
- [6] Q. Qiu, J. Liu, J. Tian, Y. Jiao, C. Li, W. Wang, dan F. Yu, "Evaluation of The Radar QPE and Rain Gauge Data Merging Methods in Northern China." *Remote Sensing*, 12(3), 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12030363>.
- [7] N. Ananda, H. Hartanto, dan D. Kurniadi, "Preliminary Evaluation of Weather Radar Rainfall Estimation in Bandung City," *8th International Conference on Instrumentation, Control, and Automation (ICA)*, IEEE, 76–80, 2023. <https://doi.org/10.1109/ICA58538.2023.10273091>.
- [8] R. B. Sharif, E. H. Habib, dan M. ElSaadani, "Evaluation of Radar-Rainfall Products Over Coastal Louisiana," *Remote Sensing*, 12(9), 1477, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12091477>.
- [9] A. Kosasih, H. Hartono, dan R. H. Jatmiko, "Pengaruh Koreksi Atenuasi Radar Cuaca terhadap Perhitungan Estimasi Curah Hujan di Jawa Timur." *Jurnal Teknosains*, 10(2), 111, 2021. <https://doi.org/10.22146/teknosains.53452>.
- [10] L. Ardiyanto, A. M. Hanif, M. Alfaridzi, S. Ariwibowo, E. Wardoyo, dan I. R. Nugraheni, "Estimasi Curah Hujan Radar Cuaca dengan Hubungan Z-R Berbeda pada Tipe Awan Hujan Konvektif dan Stratiform di Lampung." *Prosiding SNFA (Seminar Nasional Fisika Dan Aplikasinya)*, 4, 51, 2019. <https://doi.org/10.20961/prosidingsnfa.v4i0.35912>.
- [11] A. Ali, I. H. Umam, H. Leijnse, dan U. Sa'adah, "Preliminary Study of A Radio Frequency Interference Filter for Non-Polarimetric C-Band Weather Radar in Indonesia (Case Study: Tangerang Weather Radar)," *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, 18(2), 189–202, 2021. <https://doi.org/10.30536/j.ijreses.2021.v18.a3727>.
- [12] B. H. K. Tjasyono, "Variasi Iklim Musiman dan Non Musiman di Indonesia." *Prosiding Lokakarya Meteorologi Geofisika dan Klimatologi untuk Media dan Pengguna Jasa*, 2007.
- [13] M. Heistermann, S. Jacobi, and T. Pfaff, "Technical Note: An Open Source Library for Processing Weather Radar Data (Wradlib)," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 17, no. 2, pp. 863–871, 2013. doi: 10.5194/hess-17-863-2013.
- [14] J. S. Marshall & W. M. K. Palmer, "The Distribution of Raindrops with Size." *Journal of Meteorology*, 5(4), 165–166, 1948. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1948\)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1948)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2).
- [15] T. D. Hutapea, D. S. Permana, A. S. Praja & L. F. Muzayanah, "Modifikasi Konstanta Persamaan ZR Radar Surabaya untuk Peningkatan Akurasi Estimasi Curah Hujan." *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 21(2), 91–97. 2021.
- [16] W. Tahir, M. A. Mohd Ariffin, J. Abdullah, Z. Ibrahim, S. Ramli, S. Mohd Deni, H. Hassan, L. Mohd Sidek, Y. W. Sang, D. J. Yik, & N. K. Chang, "Mean Field Bias Correction to Radar QPE as Input to Flood Modeling for Malaysian River Basins." *International Journal of Integrated Engineering*, 14(5). <https://doi.org/10.30880/ijie.2022.14.05.019>, 2022.
- [17] B. I. Abadi & R. Sumiharto, "Klasifikasi Curah Hujan Menggunakan Neuro-Fuzzy System Melalui Citra Radar Cuaca." *IJEIS (Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems)*, 11(1), 49, (2021). <https://doi.org/10.22146/ijeis.57980>.
- [18] E. Goudenhoofd and L. Delobbe, 'Evaluation of Radar-Gauge Merging Methods for Quantitative Precipitation Estimates', *Hydrol Earth Syst Sci*, vol. 13, no. 2, pp. 195–203, Feb. 2009, doi: 10.5194/hess-13-195-2009.
- [19] D. M. Putri, Y. Nugroho, J. Rahmad Pratama, S. Meteorologi Iskandar, K. Barat, & K. Tengah, "Kajian Implementasi Quality Control Faktor Bright Band dan Atenuasi Radar Cuaca C-Band." *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, Vol. 09, Issue 01, 2021.
- [20] A. Ali, F. Lubis, & U. Sa'adah, "Komparasi Algoritma Asimilasi Data Radar-Rain Gauge dalam Peningkatan Akurasi Quantitative Precipitation Estimation (QPE): Mean Field Bias (MFB) dan Brandes Spatial Adjustment (BRA)," *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 24(1), 35–42, 2023.

- [21] R. O. Imhoff, C. C. Brauer, A. Overeem, A. H. Weerts & R. Uijlenhoet, "Spatial and Temporal Evaluation of Radar Rainfall Nowcasting Techniques on 1,533 Events," *Water Resources Research*, 56(8), 2020. <https://doi.org/10.1029/2019WR026723>.