

KOMPARASI ALGORITMA ASIMILASI DATA RADAR-RAIN GAUGE DALAM PENINGKATAN AKURASI QUANTITATIVE PRECIPITATION ESTIMATION (QPE): MEAN FIELD BIAS (MFB) DAN BRANDES SPATIAL ADJUSTMENT (BRA)

A Comparison Of Radar-Rain Gauge Data Merging Algorithm To Enhance Quantitative Precipitation Estimation (QPE): Mean Field Bias (MFB) And Brandes Spatial Adjustment (BRA)

Abdullah Ali¹⁾, Fachruddin Lubis²⁾, Umi Sa'adah³⁾

¹⁾ Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. Jl. Angkasa 1 No. 2, Kec. Kemayoran, Kota Jakarta Pusat, DKI Jakarta 10610

²⁾ Stasiun Meteorologi Maritim Paoetere Makassar. I. Sabutung No.30, Gusung, Kec. Ujung Tanah, Kota Makassar, Sulawesi Selatan 90163

³⁾ Stasiun Meteorologi Soekarno-Hatta. Sabutung No.30, Gusung, Kec. Ujung Tanah, Kota Makassar, Sulawesi Selatan 90163

*E-mail : abdullah.ali@bmet.go.id

Intisari

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan performa algoritma Mean Field Bias (MFB) dan Brandes Spatial Adjustment (BRA) dalam meningkatkan akurasi Quantitative Precipitation Estimation (QPE) pada radar cuaca Tangerang. Filter interferensi diterapkan untuk menghilangkan false echo dari sumber gelombang elektromagnetik lain di sekitar radar Tangerang. Perbedaan mendasar dari algoritma MFB dan BRA adalah pada perhitungan faktor koreksi, dimana faktor koreksi algoritma BRA bergantung pada jarak rain-gauge terhadap radar cuaca. Studi kasus yang digunakan adalah kejadian hujan lebat tanggal 12 Desember 2018 yang terdeteksi oleh radar Tangerang. Data rain-gauge yang digunakan sebagai korektor berjumlah 88 penakar. Berdasarkan hasil perhitungan faktor koreksi, algoritma MFB menghasilkan faktor koreksi yang lebih tinggi yang terkonsentrasi di bagian Barat radar Tangerang pada rentang 2.4 hingga 3.2, sedangkan faktor koreksi algoritma BRA lebih homogen pada rentang 0 hingga 1.5. Perbandingan peningkatan akurasi diukur berdasarkan penurunan error pada nilai QPE. Berdasarkan tiga lokasi raingauge, algoritma MFB memberikan penurunan error yang lebih signifikan dibandingkan dengan algoritma BRA.

Kata Kunci: Asimilasi Radar-rain Gauge, QPE, MFB, BRA.

Abstract

This research aims to compare the performance of the Mean Field Bias (MFB) and Brandes Spatial Adjustment (BRA) algorithms in increasing the accuracy of Quantitative Precipitation Estimation (QPE) on the Tangerang weather radar. An interference filter is applied to eliminate false echoes from other sources of electromagnetic waves around the Tangerang radar. The fundamental difference between the MFB and BRA algorithms is in the calculation of the correction factor, where the correction factor for the BRA algorithm depends on the distance of the rain gauge to the weather radar. The case study used is the heavy rain event on December 12 2018 which was detected by Tangerang radar. The rain-gauge data used as a corrector is 88 gauges. Based on the results of the correction factor calculations, the MFB algorithm produces a higher correction factor which is concentrated in the western part of the Tangerang radar in the range 2.4 to 3.2, while the BRA algorithm correction factor is more homogeneous in the range 0 to 1.5. The comparison of increased accuracy is measured based on the decrease in error in the QPE value. Based on three rain gauge locations, the MFB algorithm provides a more significant error reduction compared to the BRA algorithm.

Keywords: Radar-rain Gauge Merging, QPE, MFB, BRA

1. PENDAHULUAN

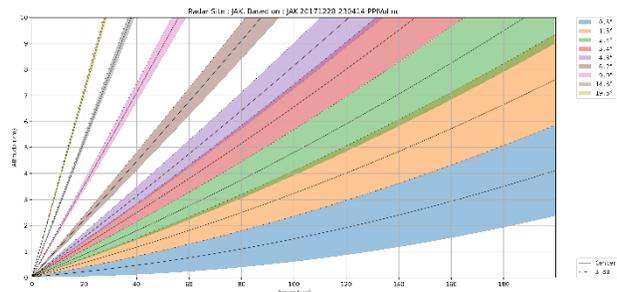
Estimasi curah hujan sulit dilakukan jika hanya mengandalkan satu instrumen. Penakar hujan konvensional memiliki akurasi yang tinggi namun, informasi yang dikumpulkan masih berupa titik yang tidak terdistribusi secara merata sehingga tingkat keterwakilan spasialnya masih terbatas (Zhang et al., 2010). Penggunaan radar cuaca dapat mengatasi masalah distribusi spasial dari hasil pengamatan curah hujan konvensional, namun memiliki tingkat akurasi yang lebih rendah karena curah hujan yang dihasilkan berupa nilai estimasi (Ali et al., 2018). Kedua instrumen tersebut dapat dikombinasikan untuk menghasilkan estimasi curah hujan yang lebih akurat dan memiliki distribusi spasial yang lebih baik (Ali et al., 2020).

Terdapat beberapa metode peningkatan akurasi estimasi curah hujan kuantitatif atau Quantitative Precipitation Estimation (QPE) berdasarkan asimilasi data radar-rain gauge. Goudenhoofdt et al., (2009) meningkatkan akurasi QPE dengan menjumlahkan nilai bias dari estimasi curah hujan radar dengan nilai pengamatan penakar hujan, metode tersebut dinamakan *Mean Field Bias* (MFB). Metode asimilasi Brandes Spatial Adjustment (BRA) memiliki konsep yang sama namun lebih memperhitungkan pengaruh variabilitas spasial dari jarak titik pengamatan terhadap setiap grid data radar cuaca (Goudenhoofdt et al., 2009). Kumar (2009) telah menguji metode MFB dan BRA di wilayah Belgia, dimana metode MFB dan BRA dapat mengurangi kesalahan estimasi curah hujan berbasis data radar masing-masing 47% dan 45%.

Pengaplikasian algoritma asimilasi data radar cuaca dan pengamatan permukaan di Indonesia belum dilakukan secara optimal pada jaringan radar cuaca dan pengamatan permukaan di Indonesia. Nilai QPE yang telah terkoresi oleh hasil pengamatan penakar hujan dapat dimanfaatkan dalam banyak hal, seperti verifikasi output *nowcasting* (Ali et al., 2021; Lukita et al 2018), hingga bahan pertimbangan pembuatan peringatan dini cuaca dalam sistem informasi terintegrasi (Ali et al, 2022). Dengan melihat nilai kemanfaatan yang begitu luas penting untuk dilakukan kajian komparasi metode yang tepat untuk meningkatkan akurasi QPE. Penelitian terakhir mengenai peningkatan akurasi curah hujan berdasarkan asimilasi data radar-rain gauge di Indonesia dilakukan oleh Ali et al (2020) dengan menggunakan metode MFB. Sebagai lanjutan dari penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan komparasi metode MFB dan BRA dalam meningkatkan akurasi QPE berdasarkan asimilasi data radar cuaca dan pengamatan permukaan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode analisis spasial dan kuantitatif. Studi kasus yang digunakan adalah kejadian hujan lebat yang terdeteksi oleh radar cuaca BMKG yang terpasang di Tangerang. Sebelum dilakukan asimilasi data radar-rain gauge, dilakukan filter interferensi berdasarkan hasil penelitian Ali et al., (2021) untuk meminimalkan kesalahan estimasi curah hujan akibat interferensi. Radar cuaca Tangerang merupakan tipe C-Band Non Polarimetric, spesifikasi radar cuaca Tangerang terdapat pada Tabel 1.



Gambar 1. Scanning radar cuaca Tangerang

Tabel 1. Spesifikasi radar cuaca Tangerang

Parameter	Value
Radar site name	Tangerang
Latitude	-6.1669° S
Longitude	106.6502° E
Altitude	10 m
Tower height	20 m
Frequency	5.6 GHz
Beam width	<1°
Pulse width	0.5 - 2.0 μ s
PRF Min	250 Hz
PRF Max	1200 Hz
Number of sweeps	6
Nquist Velocity	24.1 m/s
Transmitter Type	Coaxial magnetron
Polarization	Single
Installation year	2009
Manufacturer	EEC

Variabel QPE dihitung berdasarkan akumulasi estimasi curah hujan dalam periode 1 jam, dimana persamaan Z-R yang digunakan adalah Rosenfeld-Tropical. Koreksi metode MFB diterapkan dengan mengasumsikan bahwa estimasi radar dipengaruhi oleh kesalahan multiplikasi yang seragam dan dihitung pada setiap titik penakar hujan. Perhitungan nilai factor koreksi MFB dan nilai estimasi curah hujan terkoresi terdapat pada persamaan 1 dan 2.

$$C_{MFB} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad [1]$$

$$Ri_{adj} = C_{MFB} \cdot R_i \quad [2]$$

Dimana C_{MFB} merupakan faktor koreksi MFB, n adalah jumlah pasangan data radar-penakar hujan yang valid, G_i curah hujan pada penakar hujan ke- i , R_i piksel radar pada lokasi penakar hujan ke- i , dan Ri_{adj} merupakan nilai piksel radar terkoreksi pada lokasi penakar hujan ke- i

Pada metode asimilasi BRA, konstanta faktor koreksi dipengaruhi nilai bobot dari hasil pengamatan penakar hujan yang bergantung pada jarak antara lokasi *rain-gauge* dengan pixel hasil pengamatan radar yang akan dikoreksi (Michelson et al., 2000). Koreksi QPE menggunakan metode asimilasi BRA dihitung menggunakan persamaan 3, 4, 5, dan 6.

$$C_{BRA} = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i (G_i/R_i)}{\sum_{i=1}^N \omega_i} \quad [3]$$

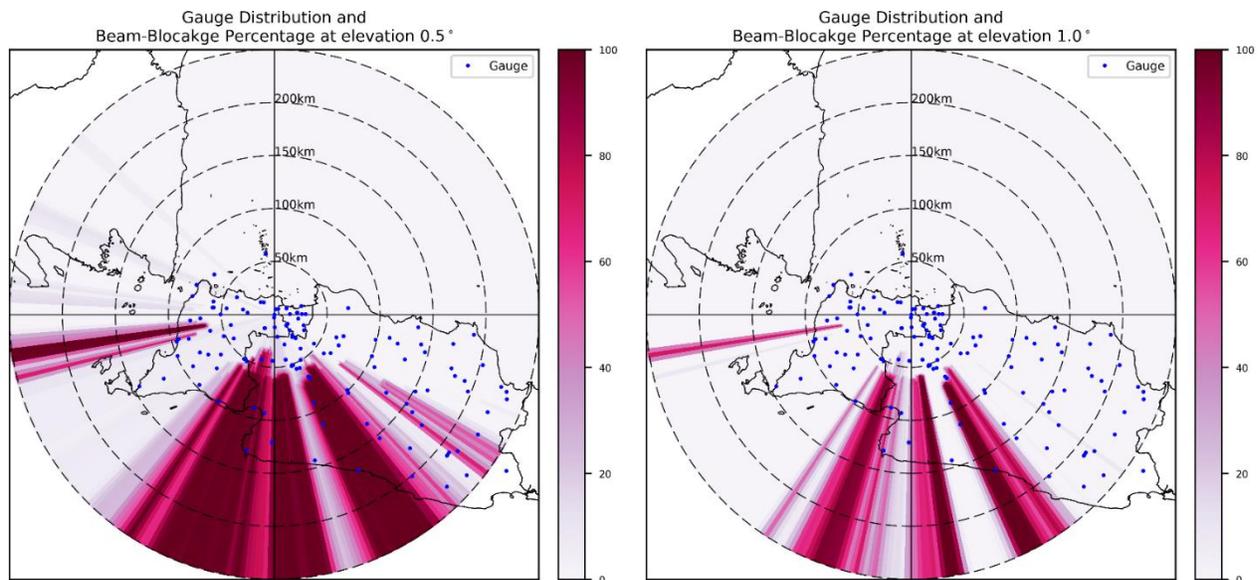
$$Ri_{adj} = C_{BRA} \cdot R_i \quad [4]$$

$$\omega_i = \exp \frac{-d_i^2}{k} \quad [5]$$

$$k = (2\delta)^{-1} \quad [6]$$

Dimana C_{BRA} merupakan faktor koreksi BRA, n merupakan jumlah pasangan data radar-penakar hujan yang valid, G_i curah hujan pada penakar hujan ke- i , R_i merupakan piksel radar pada lokasi penakar hujan ke- i , Ri_{adj} adalah nilai piksel radar terkoreksi pada lokasi penakar hujan ke- i , dan k merupakan fungsi dari kepadatan rata-rata δ dari jaringan, yang diberikan oleh jumlah pengukur dibagi dengan total area.

Data pengamatan permukaan yang digunakan merupakan hasil pengamatan curah hujan dari jaringan pengamatan AWS dan ARG BMKG yang tersebar di Provinsi Banten, DKI Jakarta, dan Jawa Barat sesuai dengan cakupan radar cuaca Tangerang. Terdapat beberapa *rain-gauge* yang tidak digunakan karena berada dalam wilayah pengamatan radar cuaca yang terkena *partial blocking* maupun *total blocking*. Distribusi *rain-gauge* yang terkena *bloking* pada dua elevasi terendah terdapat pada Gambar 1. Total jumlah *rain-gauge* yang digunakan dalam penelitian ini adalah 88 penakar.



Gambar 1. Distribusi lokasi *rain-gauge* yang digunakan berdasarkan area *coverage* pengamatan radar cuaca Tangerang. Besaran *blocking* digambarkan dengan warna merah muda dengan satuan persen (%). Lokasi *rain-gauge* yang terdapat pada area *partial blocking* maupun *total blocking* dieliminasi dalam perhitungan faktor koreksi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Perhitungan Faktor Koreksi MFB dan BRA

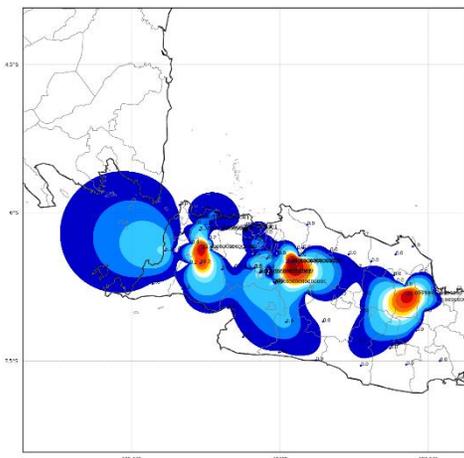
Gambar 2a merupakan hasil interpolasi sebaran data banding yakni data *rain gauge* pada jam 09.00 UTC. Data banding di wilayah DKI Jakarta, Jawa Barat, dan Banten tersebar dan terlihat bahwa dari sebaran titik tersebut terinterpolasi secara spasial berdasarkan metode RBF linear. Pada kasus tersebut, terlihat wilayah barat dari *site* radar interpolasi dilakukan dengan melihat kecenderungan yang semakin menjauhi radar maka semakin kecil nilai hujan interpolasinya.

Gambar 2b *radar unadjusted* merupakan estimasi curah hujan kuantitatif radar Tangerang pada jam 09.00 UTC. Terlihat bahwa terjadi hujan dengan intensitas lebat di beberapa wilayah pada range radar Tangerang. Sebelah tenggara dan barat daya dari *site* radar relatif hampir sama nilai curah hujan sekitar >20 mm/jam berdasarkan analisis spasial. Jika dibandingkan dengan *gauge interpolation* yakni masih ada beberapa wilayah yang curah hujannya kurang maksimal dan belum bisa terdeteksi oleh radar untuk curah hujan kuantitatif. Sekitar dari range radar sebelah utara dan barat masih terlihat curah hujan dengan

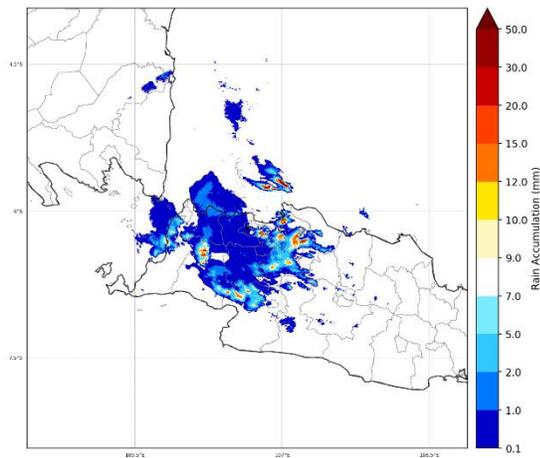
intensitas ringan <5 mm/jam. Data *gauge interpolation* sebelah timur terdapat curah hujan sangat lebat dengan intensitas >50 mm/jam pada titik ARG Cariu ($6.498064^{\circ}\text{LS}$, $107.125061^{\circ}\text{BT}$) dibandingkan titik yang sama pada *radar unadjusted*.

Faktor koreksi MFB seperti pada Gambar 2c merupakan hasil dari perbandingan *gauge interpolation* dan *radar unadjusted*. Semakin besar nilai dari koreksi MFB tersebut, maka *gauge interpolation* lebih besar dari pada *radar unadjusted* pada range cakupan radar cuaca Tangerang. Terlihat pada Gambar 2c bahwa daerah sekitar radar tangerang pada saat hujan lebat memiliki tingkat koreksi yang cukup tinggi sekitar 2.4 – 3.2 di wilayah barat dari *site* radar. Selebihnya hanya memiliki koreksi yang tidak banyak sekitar 0.8 – 1.2 bahkan ada beberapa daerah yang hanya memiliki faktor 0 – 0.4.

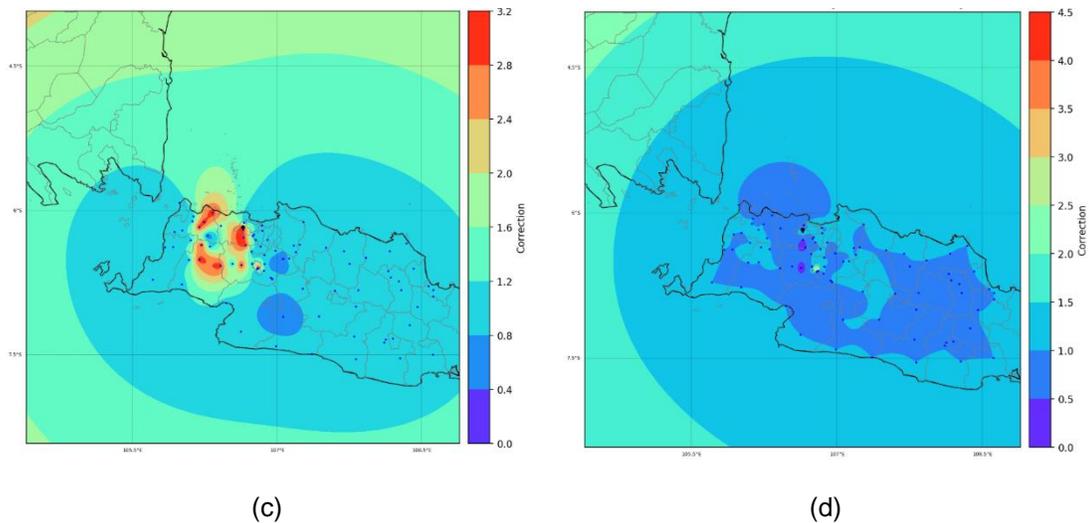
Sama halnya dengan faktor koreksi MFB, Semakin besar nilai dari koreksi MFB tersebut, maka *gauge interpolation* lebih besar daripada *radar unadjusted* pada range cakupan radar cuaca Tangerang. Terlihat pada Gambar 2d bahwa koreksi untuk asimilasi BRA tidak terlalu besar hanya pada kisaran 0 – 1.5. Koreksi BRA ini selanjutnya menjadi faktor koreksi dari data curah hujan radar menggunakan persamaan [4].



(a)



(b)



Gambar 2. (a) Interpolasi rain gauge pada domain coverage radar Tangerang. (b) QPE unadjusted. (c) hasil perhitungan koreksi algoritma MFB. (d) hasil perhitungan koreksi algoritma BRA

3.2. Koreksi QPE berdasarkan Metode MFB dan BRA

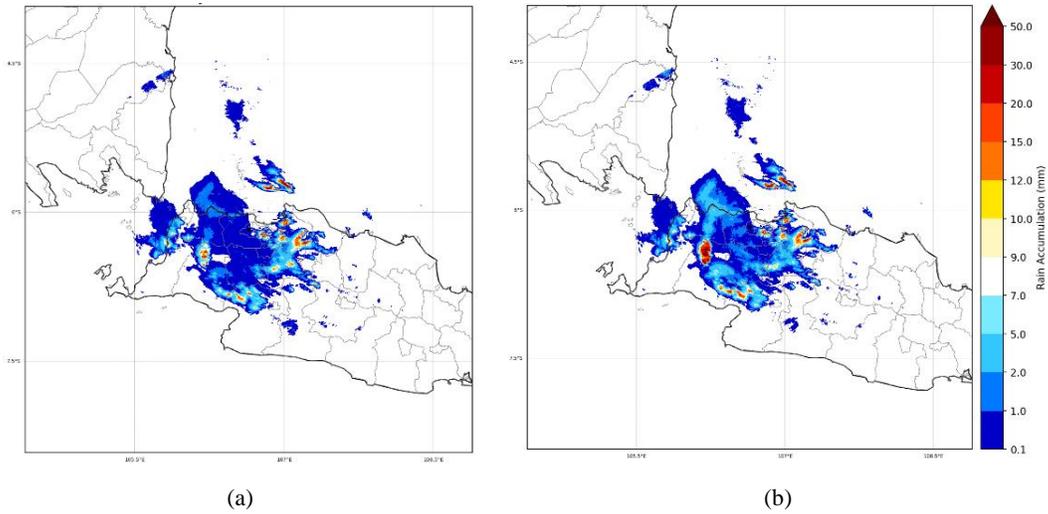
Hasil dari faktor koreksi MFB ini selanjutnya diasimilasikan dengan menggunakan persamaan [2] diperoleh estimasi curah hujan yang baru hasil dari asimilasi menggunakan metode MFB. Estimasi curah hujan radar cuaca selanjutnya dikoreksi dengan menggunakan koreksi yang telah didapatkan dan koreksi ini dilakukan untuk setiap grid yang telah disesuaikan dari estimasi curah hujan dan *rain gauge*.

Estimasi curah hujan kuantitatif hasil dari asimilasi menggunakan metode MFB pada Gambar 3 merupakan curah hujan kumulatif selama satu jam pada jam 09.00 UTC. Terlihat pada gambar bahwa terjadi perubahan curah hujan yang cukup signifikan pada wilayah barat daya dari *site* radar Tangerang. Secara spasial dapat dilihat bahwa ada perbaikan citra radar untuk curah hujan setelah asimilasi jika dibandingkan dengan curah hujan yang belum diasimilasi. Beberapa wilayah terlihat adanya penambahan curah hujan terutama wilayah dengan intensitas sedang hingga lebat. Curah hujan sebelum asimilasi pada wilayah barat daya dari *site* radar bervariasi mulai dari 7 sampai 20 mm/jam. Setelah asimilasi terlihat bahwa terdapat perubahan

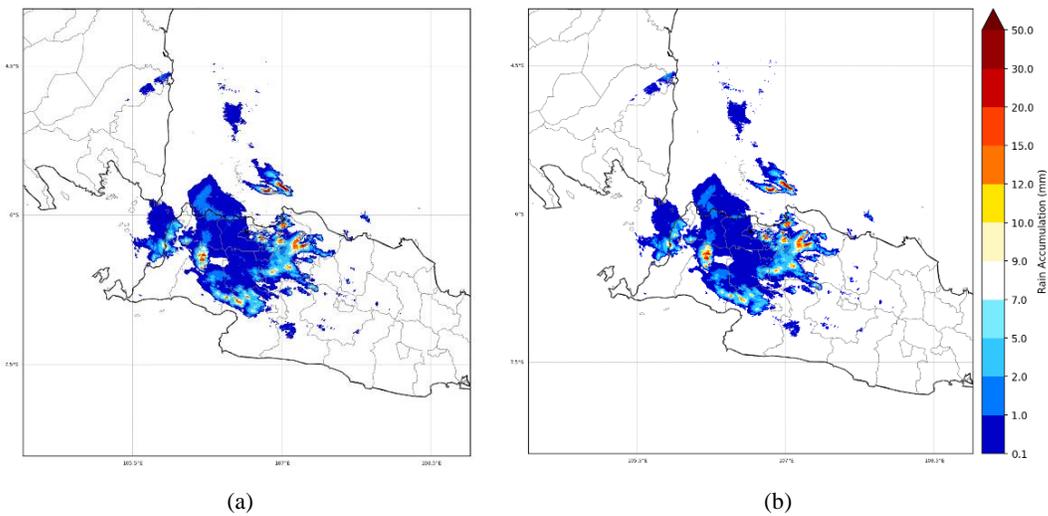
curah hujan yang cukup signifikan dengan nilai curah hujan sekitar 15 – 30 mm/jam.

Sama halnya dengan faktor koreksi MFB, Semakin besar nilai dari koreksi MFB tersebut, maka *gauge interpolation* lebih besar daripada *radar unadjusted* pada range cakupan radar cuaca Tangerang. Terlihat pada Gambar 2d bahwa koreksi untuk asimilasi BRA tidak terlalu besar hanya pada kisaran 0 – 1.5. Koreksi BRA ini selanjutnya menjadi faktor koreksi dari data curah hujan radar menggunakan persamaan [4].

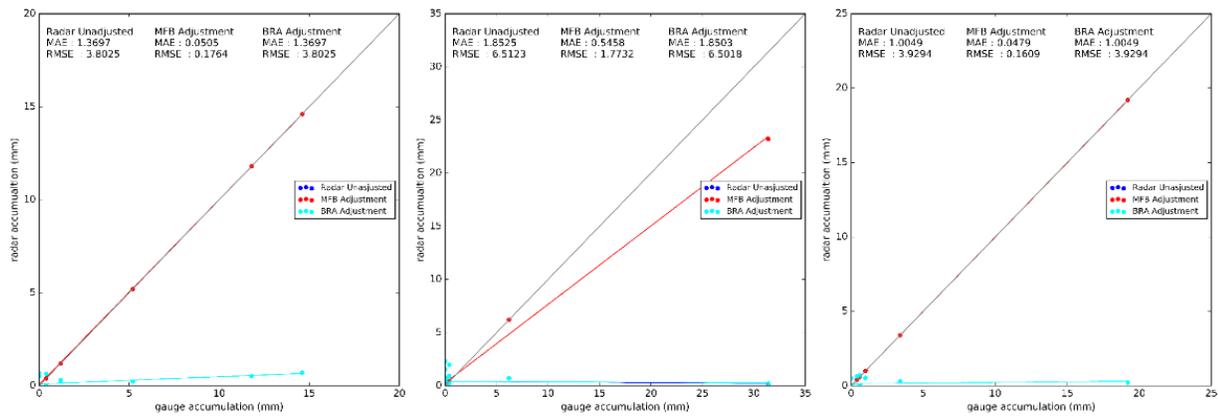
Estimasi curah hujan kuantitatif hasil dari asimilasi menggunakan metode BRA pada Gambar 4 merupakan curah hujan kumulatif selama satu jam pada jam 09.00 UTC. Terlihat pada gambar tersebut bahwa terdapat beberapa perubahan dari curah hujan hasil asimilasi BRA tetapi perubahannya tidak cukup signifikan diakibatkan dari nilai faktor koreksi BRA tidak terlalu besar bahkan terlihat pada gambar terdapat beberapa wilayah yang mengalami pengurangan curah hujan akibat asimilasi seperti wilayah sebelah barat laut dari *site* radar Tangerang.



Gambar 3. Hasil koreksi MFB. (a) QPE *unadjusted*. (b) QPE *adjusted* algoritma MFB



Gambar 4. Hasil koreksi BRA. (a) QPE *unadjusted*. (b) QPE *adjusted* algoritma BRA.



Gambar 5. Scatter plot estimasi curah hujan kuantitatif (a) AAWS Serang (b) ARG Bojong Leles (c) AWS Leuwidamar

3.3. Verifikasi Hasil Koreksi MFB dan BRA

Verifikasi yang dilakukan pada 3 titik sampel AWS dan ARG ditampilkan dalam bentuk *scatter plot* untuk memperlihatkan korelasi dan tingkat kesalahan dari estimasi curah hujan radar hasil asimilasi. Gambar 5(a) merupakan *scatter plot* dari AAWS Serang yang menunjukkan bahwa nilai dari estimasi curah hujan asimilasi MFB dan BRA cenderung lebih baik dibandingkan dengan estimasi curah hujan tanpa asimilasi. Tingkat kesalahan estimasi curah hujan pada AAWS Serang dalam hal ini MAE dan RMSE untuk *radar unadjusted*, MFB *adjustment* dan BRA *adjustment* masing-masing untuk *radar unadjusted* sebesar 1.3697 dan 3.8025, MFB *adjustment* sebesar 0.0505 dan 0.1764 serta BRA *adjustment* sebesar 1.3697 dan 3.8025.

Gambar 5(b) merupakan *scatter plot* dari ARG Bojong Leles (6.3559° LS 106.2163° BT) yang menunjukkan bahwa nilai dari estimasi curah hujan asimilasi MFB dan BRA cenderung lebih baik dibandingkan dengan estimasi curah hujan tanpa asimilasi. Tingkat kesalahan estimasi curah hujan pada ARG Bojong Leles dalam hal ini MAE dan RMSE untuk *radar unadjusted*, MFB *adjustment* dan BRA *adjustment* masing-masing untuk *radar unadjusted* sebesar 1.8525 dan 6.5123, MFB *adjustment* sebesar 0.5458 dan 1.7732 serta BRA *adjustment* sebesar 1.8503 dan 6.5018.

Gambar 5(c) merupakan *scatter plot* dari AWS Leuwidamar (6.509814° LS 106.192172° BT) yang menunjukkan bahwa nilai dari estimasi curah hujan asimilasi MFB dan BRA cenderung lebih baik dibandingkan dengan estimasi curah hujan tanpa asimilasi. Tingkat kesalahan estimasi curah hujan pada AWS Leuwidamar dalam hal ini MAE dan RMSE untuk *radar unadjusted*, MFB *adjustment* dan BRA *adjustment* masing-masing untuk *radar unadjusted* sebesar 1.0049 dan 3.9294, MFB *adjustment* sebesar 0.0479 dan 0.1609 serta BRA *adjustment* sebesar 1.0049 dan 3.9294.

Terlihat dari Gambar 5 bahwa nilai korelasi setelah asimilasi relatif dapat memperbaiki estimasi curah hujan radar. Nilai korelasi hasil estimasi curah hujan asimilasi mengindikasikan bahwa hubungan antara curah hujan *rain gauge* dari 3 titik sampel dengan estimasi curah hujan radar cuaca sangat tinggi. Begitupun terlihat dari hasil MAE dan RMSE yang semakin berkurang setelah asimilasi mengindikasikan tingkat kesalahan setelah asimilasi jauh lebih sedikit dibandingkan dengan estimasi curah hujan sebelum asimilasi walaupun terlihat pada *scatter plot* bahwa hasil estimasi curah hujan asimilasi relatif sedikit *underestimate*.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis penerapan filter interferensi serta asimilasi data radar cuaca dan *rain gauge* dengan metode *Mean Field Bias Correction* (MFB) dan *Brandes Spasial Adjustment Correction* (BRA) pada studi kasus 12 Desember 2018 untuk radar cuaca Tangerang diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

Perbandingan estimasi curah hujan kuantitatif dengan implementasi filter interferensi dan tanpa implementasi filter interferensi terlihat bahwa secara spasial estimasi curah hujan kuantitatif dengan implementasi filter interferensi lebih baik dibandingkan tanpa implementasi filter interferensi. Hal ini disebabkan filter interferensi dapat membersihkan citra radar dari *echo interference*. Namun estimasi curah hujan radar cuaca tanpa filter interferensi terlihat lebih baik dalam hal verifikasi. Hal ini disebabkan oleh pengaruh filter interferensi yang juga menghilangkan *echo precipitation*.

Perbandingan estimasi curah hujan kuantitatif asimilasi menggunakan metode *Mean Field Bias Correction* (MFB) dan *Brandes Spasial Adjustment* (BRA) dapat disimpulkan bahwa dengan asimilasi estimasi curah hujan radar cuaca dan *rain gauge* lebih baik dibandingkan *radar unadjusted*. Metode MFB dan BRA dapat meningkatkan akurasi estimasi curah hujan. Dari kedua metode tersebut, metode MFB lebih mendekati curah hujan sebenarnya yang terukur pada *rain gauge* dibandingkan metode BRA. Hal ini terbukti dari tingkat korelasi yang tinggi dan tingkat kesalahan dari metode MFB lebih rendah dibandingkan metode asimilasi BRA. Begitupun dengan hasil dari verifikasi performa untuk mengukur curah hujan dengan intensitas sesuai dengan kriteria BMKG menunjukkan bahwa asimilasi menggunakan metode MFB lebih baik dibandingkan metode BRA.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Ali, A., Adrianto, R., & Saepudin, M. (2018). Preliminary Study of Horizontal And Vertical Wind Profile Of Quasi-Linear Convective Utilizing Weather Radar Over Western Java Region, Indonesia. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences (IJReSES)*, 15(2), 177-186. Doi: 10.30536/j.ijreses.2018.v15.a3075
- Ali, A., Deranadyan, G., & Umam, I. H. (2020). An Enhancement to The Quantitative Precipitation Estimation Using Radar-Gauge Merging. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences (IJReSES)*, 17(1), 65-74. Doi: 10.30536/j.ijreses.2020.v17.a3316
- Ali, A., Supriatna, S., & Sa'adah, U. (2021). Radar-Based Stochastic Precipitation Nowcasting

- Using The Short-Term Ensemble Prediction System (Steps)(Case Study: Pangkalan Bun Weather Radar). *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences (JReSES)*, 18(1), 91-102. Doi: 10.30536/j.ijreses.2021.v18.a3527
- Ali, A., Umam, I. H., Leijnse, H., & Sa'adah, U. (2021). 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 (JReSES)*, 18(2), 189-202. Doi: 10.30536/j.ijreses.2021.v18.a3727
- Ali, A., Deranadyan, G., & Sa'adah, U. (2021). Kajian Awal Pemanfaatan Data Pengindraan Jauh Dalam Implementasi Peringatan Dini Cuaca Ekstrem Berbasis Dampak. *Prosiding WIN-ID 2021 Vol.1* pp.27-36.
- Ali, A., Umam, I. H., Heningtyas, H., Charolidya, R., Sanditya, B., Cempaka, A. P., Setyawan, T., Kiki. (2022). Pengembangan Sistem Peringatan Dini Cuaca Ekstrem Terintegrasi Berbasis Y-Model Webgis Development Methodology. *Jurnal Geografi Edukasi dan Lingkungan (JGEL)*, 6(2), 87-100.
- Goudenhoofd, E., & Delobbe, L. (2009). Evaluation of radar-gauge merging methods for quantitative precipitation estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(2), 195-203. Doi: 10.5194/hess-13-195-2009
- Kumar, S. N. (2009). Radar Based Rainfall Estimation for River Catchment Modeling (Doctoral dissertation, Katholieke Universiteit Leuven Belgium).
- Lukita, N. R., Saputra, A. H., Nugraheni, I. R., Ali, A., & Paksi, L. M. W. The Effectiveness of Clutter Map towards the Quantitative Precipitation Estimation (QPE) on the Heavy Rain Condition in the Region of Padang (a Case Study on March 26, 2018, and September 18, 2018). *PROCEEDING BOOK VOL.*, 40.
- Michelson, D. B., & Koistinen, J. (2000). Gauge-radar network adjustment for the Baltic Sea Experiment. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B. Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(10-12), 915-920. Doi: 10.1016/S1464-1909(00)00125-8
- Zhang, X., & Srinivasan, R. (2010). GIS-based spatial precipitation estimation using next generation radar and raingauge data. *Environmental Modelling & Software*, 25(12), 1781-1788. Doi: 10.1016/j.envsoft.2010.05.012

