

# Optimasi Data Radar Hujan dan Perluasan Jangkauannya Menggunakan Jaringan Radar (Data Optimization of Rain Radar and Its Coverage Expansion Using Radar Network)

Tiin Sinatra<sup>1</sup>, Ginaldi Ari Nugroho<sup>2</sup>, Asif Awaludin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional, Bandung

## Riwayat naskah

Diterima: 27-11-2019

Direvisi: 25-09-2020

Disetujui: 22-10-2020

## Korespondensi:

A. Awaludin

asif.awaludin@lapan.go.id

## ABSTRAK

Dalam penelitian ini dibangun jaringan dua buah radar hujan SANTANU milik Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer (PSTA) LAPAN yang dipasang di Bandung (SANTANU 1) dan Sumedang (SANTANU 2). Tujuannya adalah untuk meningkatkan cakupan pantauan menjadi lebih luas sehingga dapat saling melengkapi data melalui dua tahapan, yaitu optimasi data kedua radar dan pembuatan citra mozaik. Tahapan pertama, yaitu optimasi data dilakukan terhadap data hasil pendeteksian masing-masing radar SANTANU, khususnya terhadap pengaruh atenuasi sinyal oleh hujan. Hasil optimasi divalidasi menggunakan citra *transportable radar*. Dari analisis bentuk objek hujan pada irisan citra kedua radar, diperoleh  $R^2$  sebesar 0,87 yang menunjukkan bahwa hasil perbandingan luas objek dari kedua SANTANU cukup baik. Optimasi data terhadap atenuasi dengan menggunakan metode koreksi atenuasi untuk radar cuaca regional (KA) dan path-integrated attenuation (PIA) menunjukkan bahwa peningkatkan nilai reflektivitas dengan KA 10 kali lebih besar dibandingkan dengan PIA. Bentuk objek yang terdeteksi oleh SANTANU menyerupai bentuk objek yang terdeteksi oleh *transportable radar* untuk reflektivitas lebih besar dari 30 dBZ. Tahapan kedua adalah integrasi kedua citra radar untuk menghasilkan citra mozaik yang kemudian divalidasi menggunakan *transportable radar*. Pembuatan citra mozaik dilakukan dengan tiga metode, yaitu *image stitching*, perata-rataan, dan skema Cressman. Citra mozaik terbaik dari kedua SANTANU (terkoreksi atenuasi) diperoleh dari metode skema Cressman yang memperlihatkan area irisan yang lebih menyatu serta mampu mempertahankan fitur-fitur objek. Namun, waktu pemrosesan mozaik dengan skema Cressman memerlukan waktu 17 menit, lebih lama dibandingkan dengan metode *image stitching*. Waktu pemrosesan bergantung pada faktor jumlah grid data dan memori hardware proses data. Validasi hasil mozaik dengan data referensi (*transportable radar*) yang dilakukan dengan menerapkan metode *structural similarity* (SSIM) memperlihatkan nilai rata-rata 0,32. Optimasi hasil mozaik dengan *speckle removal* mampu meningkatkan nilai SSIM hingga 59%.

**Kata kunci:** deteksi manuver, *moving windows curve fitting*, *two-line element*

## ABSTRACT

This research developed a network of two SANTANU rain radars of the Center for Atmospheric Science and Technology LAPAN installed in Bandung (SANTANU 1) and Sumedang (SANTANU 2). The objectives are to obtain wider coverage so that data can complement each other through two stages, namely radar data optimization and mosaic image creation. The first step is conducted by optimization of each radar data particularly due to rain attenuation. The results are validated using the transportable radar image. The shape analysis on a rain object detected in the slice of both radar images indicates 0.87 of  $R^2$  which shows the width of both

objects has a good similarity. Data optimization due to rain attenuation using attenuation correction for regional weather radar (KA) and path-integrated attenuation (PIA) indicate that the reflectivity improvement by KA is 10 times better than PIA. The object detected by SANTANU rain radar is similar to the transportable radar for reflectivity larger than 30 dBZ. The next step is an integration of both rain radar images to create a mosaic image and then validation using the transportable radar data. The production of the mosaic image is tried out using three methods: image stitching, averaging, and the Cressman scheme. The best result is presented by the Cressman scheme which shows a more integrated slice area and maintains the features of the object. However, the processing time of this scheme is 17 minutes which is longer than the image stitching method. The processing time depends on the number of grid data and hardware memory. Validation of the mosaic result by using transportable radar data by implementing the structural similarity index (SSIM) method yields an average value of 0.32. The improvement of SSIM value is obtained if speckle removal is applied by recording 59% of enhancement.

**Keywords:** rain radar, radar network, attenuation, mosaic

---

## 1. Pendahuluan

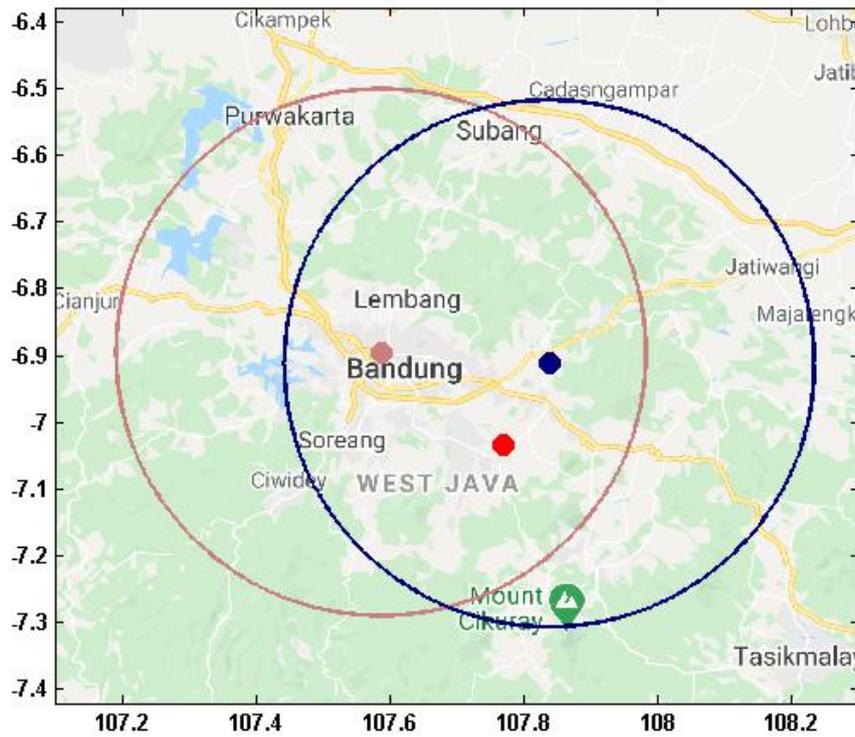
PSTA telah mengembangkan radar hujan dengan memanfaatkan radar navigasi untuk memantau hujan sejak tahun 2012. Kegiatan ini terus dilakukan hingga pada tahun 2016 dikembangkan sistem pemantauan hujan berbasis radar *X-band* yang dikenal dengan nama SANTANU. Radar ini memiliki cakupan deteksi yang lebih rendah dibandingkan dengan radar cuaca sehingga radar ini bersifat komplementer untuk menjangkau area yang tidak dijangkau radar cuaca yang ada. Penggunaan radar *X-band* menjadi tren dalam jaringan radar cuaca sebagai alternatif ataupun pelengkap terhadap radar *C* dan *S-band* karena kemampuannya memberikan resolusi lebih baik dibandingkan radar *C* dan *S-band* (Lengfeld *et al.*, 2014; Trabal *et al.*, 2013).

Di samping itu, perlu juga dilakukan usaha untuk meningkatkan jangkauan radar hujan ini. Salah satu metodenya adalah dengan mengembangkan jaringan radar hujan. Saat ini PSTA memiliki lima radar SANTANU, dua di antaranya dipasang di PSTA (SANTANU 1) dan di Balai Pengamatan Antariksa dan Atmosfer (BPAA) Sumedang (SANTANU 2), ditunjukkan oleh Gambar 1, yang dibangun dalam rangka mengembangkan jaringan radar. Secara umum, spesifikasi SANTANU 1 dan 2 relatif sama. Salah satu hal utama yang membedakannya adalah daya puncak.

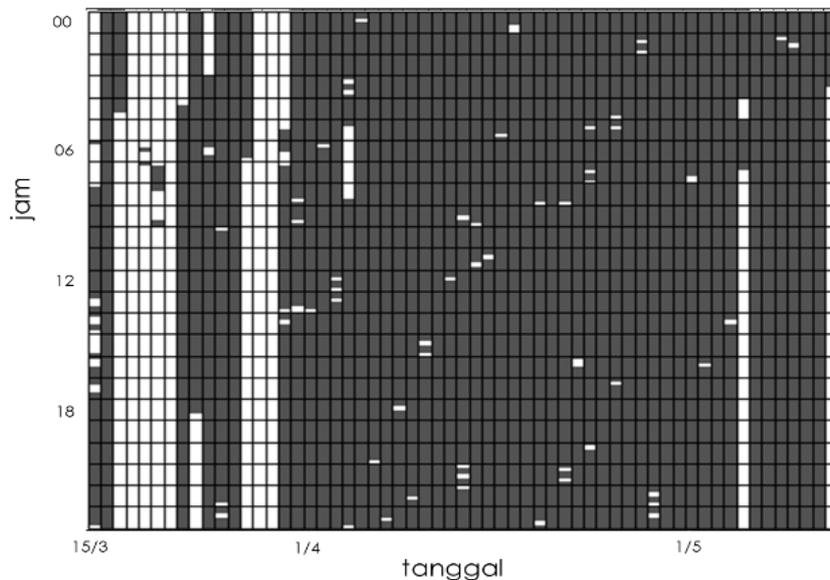
SANTANU 1 memiliki daya puncak 4 kW, sedangkan SANTANU 2 memiliki daya puncak 6 kW (Sinatra & Nugroho, 2017).

Jaringan radar dapat memberikan informasi jauh lebih baik dibandingkan dengan satu radar. Di samping memperluas cakupan pantauan, jaringan radar juga dapat saling melengkapi data pada wilayah yang berisikan. Misalnya, jika radar pertama tidak dapat mendeteksi terjadinya hujan akibat terhalang bangunan, radar kedua dapat mendeteksinya karena tidak terhalang apapun (Lengfeld *et al.*, 2014). Hal ini menunjukkan bahwa adanya jaringan radar sangat bermanfaat untuk memberikan informasi yang lebih baik. Di samping itu, jaringan radar juga dapat digunakan untuk saling kalibrasi dan koreksi data hasil dari pengamatan tiap radar, khususnya terhadap pengaruh atenuasi sinyal radar, dengan mempertimbangkan faktor geografis di area cakupan radar (Pedersen *et al.*, 2007).

Beberapa penelitian tentang pengembangan jaringan radar cuaca *X-band* telah dilakukan. Salah satunya adalah jaringan 3 buah radar cuaca *X-band* regional di Italia yang menggunakan metode komposit untuk menghasilkan citra mosaik jaringan radar. Namun, radar ini menggunakan antena *circular pencil beam* dengan *beamwidth* 3,2° dengan sudut elevasi 5° sehingga dapat meminimalkan munculnya clutter (Antonini *et al.*, 2017). Hal ini berbeda dengan tipe antena radar hujan SANTANU



Gambar 1. Titik coklat adalah lokasi SANTANU 1 di PSTA LAPAN Bandung dengan cakupan sinyalnya ditandai oleh lingkaran coklat. Titik biru adalah lokasi SANTANU 2 di BPAA LAPAN Sumedang dengan cakupan sinyalnya ditandai oleh lingkaran biru. Posisi *transportable radar* di titik berwarna merah.



Gambar 2. Hasil inventarisasi data radar cuaca LAPAN.

yang menggunakan *slotted waveguide array* yang mempunyai *beamwidth* vertikal sebesar  $22^\circ$  dengan sudut elevasi  $0^\circ$  sehingga memunculkan banyak *clutter* permukaan.

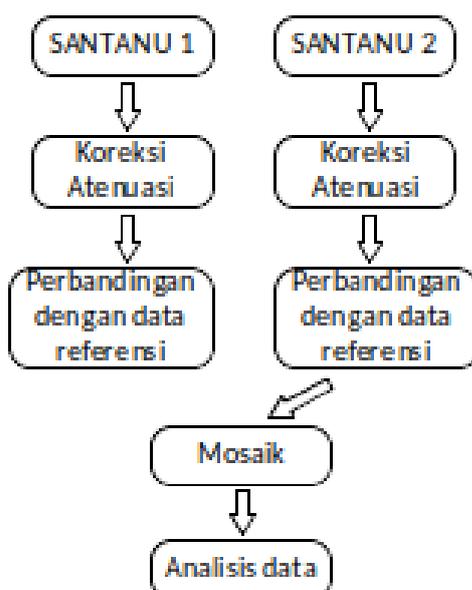
Untuk membentuk jaringan radar ini, optimasi data dari masing-masing radar dan

proses integrasi citra dari masing-masing radar menjadi sangat penting. Optimasi data terkait dengan koreksi data terhadap beberapa hal yang mempengaruhi kualitas sinyal radar. Salah satu hal yang sangat berpengaruh adalah atenuasi sinyal radar

*X-band* yang cukup besar oleh hujan dan awan. Metode yang biasa diterapkan untuk koreksi atenuasi adalah metode koreksi pada radar cuaca area lokal dan metode *path integrated attenuation* (PIA). Sementara itu, ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk proses integrasi, antara lain metode Cressman, perata-rataan, dan image stitching. Adapun fokus objek citra radar yang berusaha diintegrasikan pada penelitian ini adalah objek pada daerah irisan kedua radar.

## 2. Data dan Metodologi

Data utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah data radar hujan *X-band* SANTANU 1 dan 2. Selain itu, kegiatan ini menggunakan data pendukung dari radar cuaca *transportable* yang juga beroperasi pada frekuensi *X-band*. Kampanye dengan menggunakan *transportable radar* LAPAN pada 13 Maret - 12 Mei 2017 ditempatkan di koordinat 107,7691° BB dan -7,0351° LS (titik merah pada Gambar 1). Adapun data radar yang terinventarisasi selama kurang lebih 2 bulan kampanye ditunjukkan pada Gambar 2. Warna abu-abu menunjukkan data radar yang tersedia, sedangkan warna putih menunjukkan data radar kosong. Kekosongan data pada awal-awal kampanye di bulan Maret terjadi akibat adanya *software error* (*HWProxy error*) dan gangguan listrik.



Gambar 3. Tahapan untuk optimalisasi data dan pembuatan citra mosaik jaringan radar.

Metode yang digunakan dalam riset ini terdiri dari dua tahapan utama, yaitu optimasi data kedua radar dan pembuatan citra mosaik. Kedua tahapan tersebut diperinci seperti ditunjukkan dalam Gambar 3. Data reflektivitas yang diperoleh dari masing-masing radar dioptimasi terlebih dahulu, kemudian hasilnya dibandingkan dengan data referensi. Selanjutnya, dilakukan proses penggabungan dari dua data radar, yaitu mosaik, dilanjutkan dengan analisis data mosaik.

Adapun untuk optimasi data, terdapat beberapa metode koreksi redaman hujan yang diuji dalam penelitian ini. Metode pertama adalah koreksi atenuasi (KA) untuk radar cuaca area lokal (Pedersen *et al.*, 2010) pada satu pemindaian menggunakan Persamaan (1).

$$Z_r = Z_{g,r} \left[ 1 + \frac{\alpha \sum_{i=0}^{r-1} Z_i}{C_1 n_{sampel}} \right] \quad (1)$$

dengan  $Z_r$  adalah reflektivitas yang telah disesuaikan pada jarak  $r$ ,  $Z_{g,r}$  adalah reflektivitas tak terkoreksi pada jarak  $r$ , adalah jumlah sampel dalam satu pindaian, dan  $\alpha$  dan  $C_1$  adalah konstanta empiris.

Metode kedua adalah metode *path integrated attenuation* (PIA) yang merupakan fungsi jarak untuk panjang gelombang yang sudah diketahui (Delrieu *et al.*, 2017; Lengfeld *et al.*, 2017) dan sering diterapkan pada radar cuaca Doppler area luas menggunakan Persamaan (2).

$$PIA(r) = 2 \int_0^r \left[ \frac{Z_{am}(s)}{\alpha} \right]^{\frac{1}{\beta}} ds \quad (2)$$

dengan  $Z_{am}(s)$  adalah reflektivitas yang terukur,  $\alpha$  dan  $\beta$  adalah koefisien yang bergantung pada frekuensi radar, dan  $ds$  adalah jarak (km).

Reflektivitas yang telah dikoreksi kemudian dibandingkan dengan menggunakan data referensi, yaitu radar cuaca *X-band transportable* yang sudah tervalidasi. Langkah selanjutnya adalah mosaik data radar. Banyak referensi mengenai metode yang digunakan, salah satunya adalah dengan skema Cressman

(Zhang et al., 2005) menggunakan Persamaan (3).

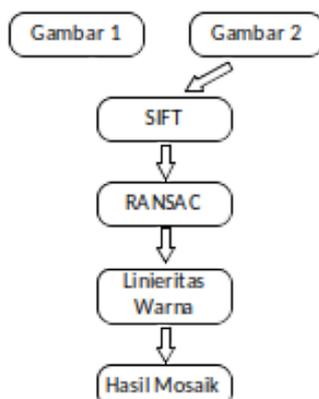
$$f_i^m = \frac{\sum_{j=1}^{nrad} w_{ij} f_{ij}^a}{\sum_{j=1}^{nrad} w_{ij}} \quad (3)$$

dengan  $f_{ij}^a$  adalah nilai pada grid ke- $i$  dari radar ke- $j$ ,  $f_i^m$  adalah reflektivitas mosaik pada titik *grid*, dan  $w_{ij}$  adalah bobot untuk nilai  $f_{ij}^a$ .

$$w_{ij} = \frac{R_1^2 - d_{ij}^2}{R_1^2 + d_{ij}^2} \quad (4)$$

Metode lain yang bisa dilakukan untuk mosaik citra adalah dengan *image processing (image stitching)* yang biasa digunakan pada pemrosesan *Very High Resolution (VHR) satellite stereo-pair imagery* (Daliakopoulos et al., 2019) dan citra *synthetic aperture radar (SAR)* (Dellinger et al., 2019). Tahapan yang dilakukan dengan *image stitching* ditunjukkan oleh Gambar 4.

*Scale Invariant Feature Transform (SIFT)* adalah algoritma yang digunakan untuk ekstraksi fitur tertentu dari suatu gambar/citra yang dapat digunakan untuk melihat kecocokan di antara sudut pandang yang berbeda dari suatu objek atau suatu pemandangan (Dellinger et al., 2019). *Random Sample Consensus (RANSAC)* adalah metode pemodelan *fitting* untuk mencari matriks homografi yang menyatakan keterkaitan antara dua gambar/citra pada bidang permukaan serta domain waktu yang sama (Dellinger et al., 2019). Penjelasan umumnya, metode ini melakukan pencarian titik-titik yang sama yang menjadi 'kunci' utama untuk menggabungkan dua gambar.



Gambar 4. Tahapan dari *image stitching*.

Setelah proses mosaik dilakukan, hal yang perlu dilakukan adalah melakukan perbandingan data SANTANU dengan data referensi, yaitu hasil pengamatan dari *transportable radar* dengan menggunakan *metode structural similarity (SSIM)* (Wang et al., 2004). Metode ini menghitung kesamaan gambar dengan memperhitungkan unsur iluminasi, kontras, dan struktur.

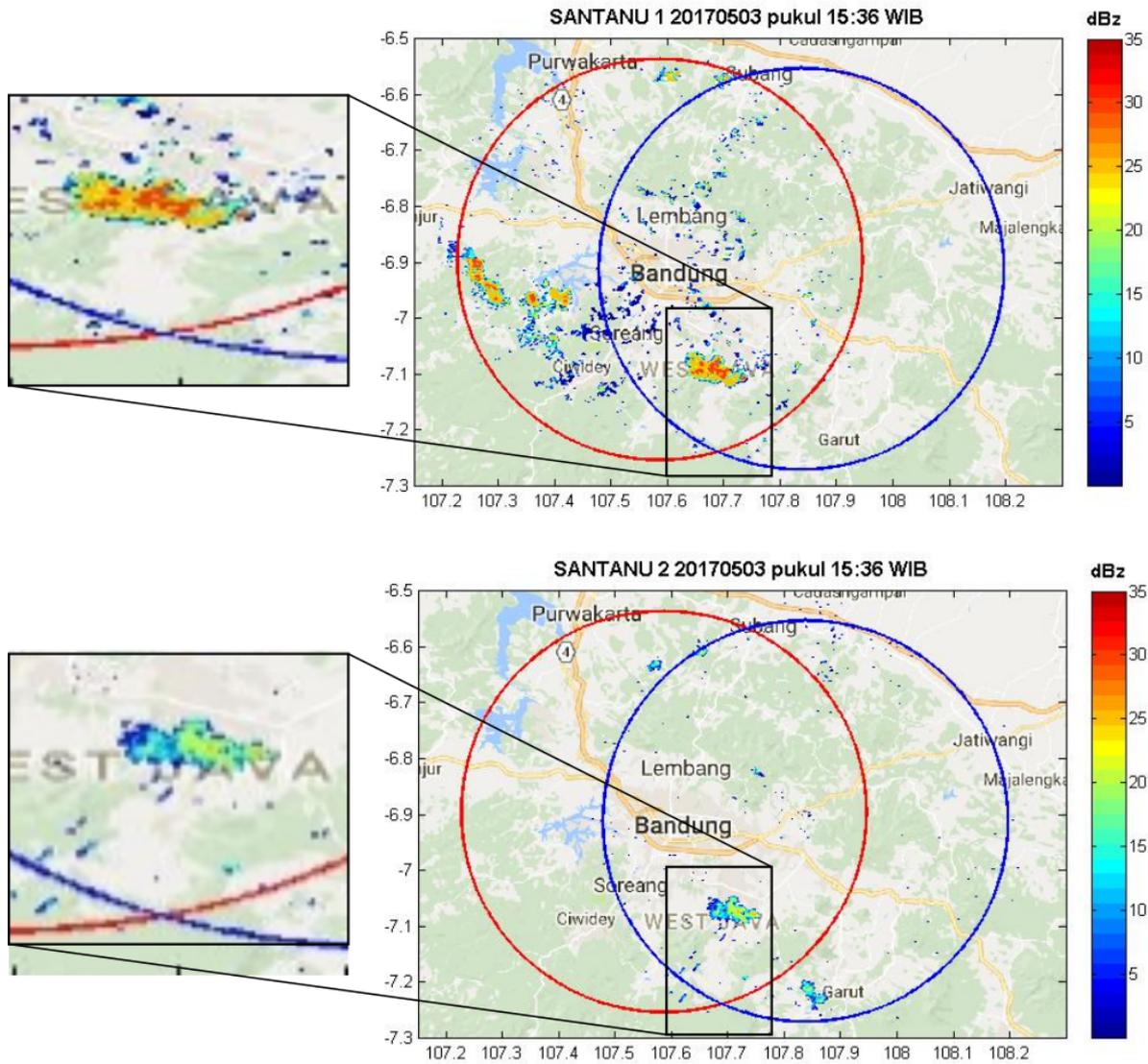
### 3. Hasil dan Pembahasan

Pada hasil inventarisasi data SANTANU 1 dan 2, dilakukan perbandingan antara kedua radar terhadap kejadian hujan yang terjadi pada bulan Maret-Mei 2017. Salah satu hasilnya terlihat pada Gambar 5 saat terjadi hujan pada 3 Mei 2017 pukul 15.36 WIB.

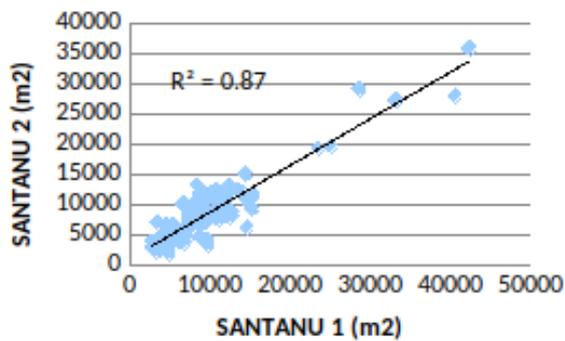
Secara umum, bentuk objek yang terdeteksi cukup mirip. Hal yang perlu diperhatikan adalah adanya sedikit perbedaan lokasi dari objek. Selain itu, reflektivitas hasil pantauan SANTANU 1 lebih besar dibandingkan SANTANU 2. Hal ini kemungkinan terjadi karena power SANTANU 2 lebih besar dibandingkan SANTANU 1 sehingga memiliki rentang reflektivitas yang lebih lebar. Pada beberapa kejadian (gambar tidak ditampilkan), objek yang terdeteksi SANTANU 1 di sekitar Lembang tidak terdeteksi oleh SANTANU 2. Hal ini terjadi karena objek terlalu jauh sehingga gelombang radar mengalami atenuasi.

Hal berikutnya yang dikerjakan adalah perbandingan luasan objek beberapa kejadian hujan yang terdeteksi pada daerah irisan SANTANU 1 dan 2 selama Maret–Mei 2017 menggunakan metode *shape analysis*. Hasilnya diplot-kan seperti yang terlihat pada Gambar 6. Dari analisis bentuk objek diperoleh  $R_2 = 0,87$  yang menunjukkan bahwa hasil perbandingan bentuk dan luas objek dari kedua SANTANU cukup baik.

Selanjutnya adalah optimasi data dengan menggunakan metode koreksi atenuasi (KA) dan *path-integrated attenuation (PIA)*, masing-masing dengan menerapkan Persamaan (1) dan Persamaan (2). Hasil optimasi dari kedua metode ini kemudian dibandingkan untuk mencari metode yang tepat dengan cara membandingkan distribusi nilai reflektivitas



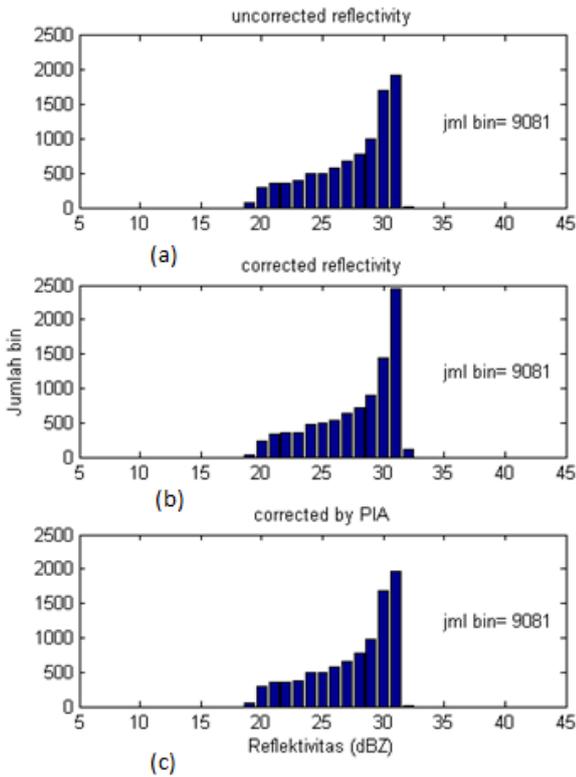
Gambar 5. Perbandingan pantauan SANTANU 1 (atas) dan SANTANU 2 (bawah) pada tanggal 3 Mei 2017.



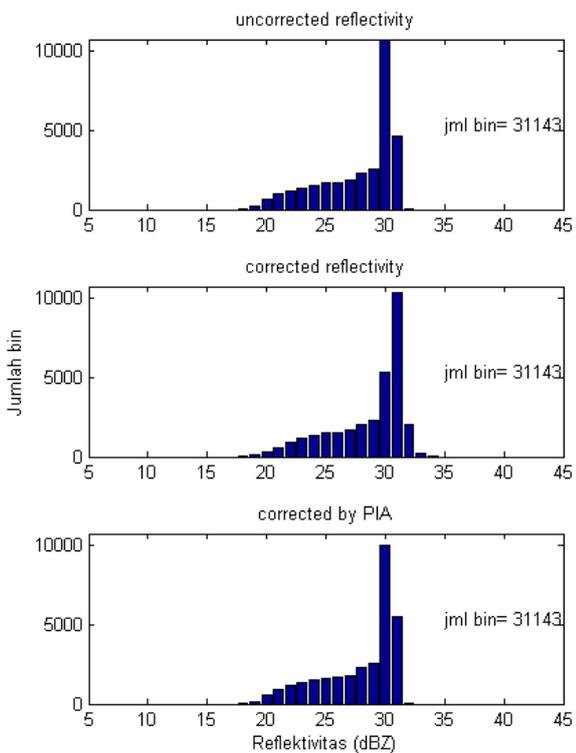
Gambar 6. Perbandingan luas objek hasil deteksi SANTANU 1 dan SANTANU 2 pada beberapa kejadian hujan selama Maret–Mei 2017.

objek hujan sebelum dan sesudah optimasi. Salah satu hasilnya ditunjukkan oleh Gambar 7 dan Gambar 8.

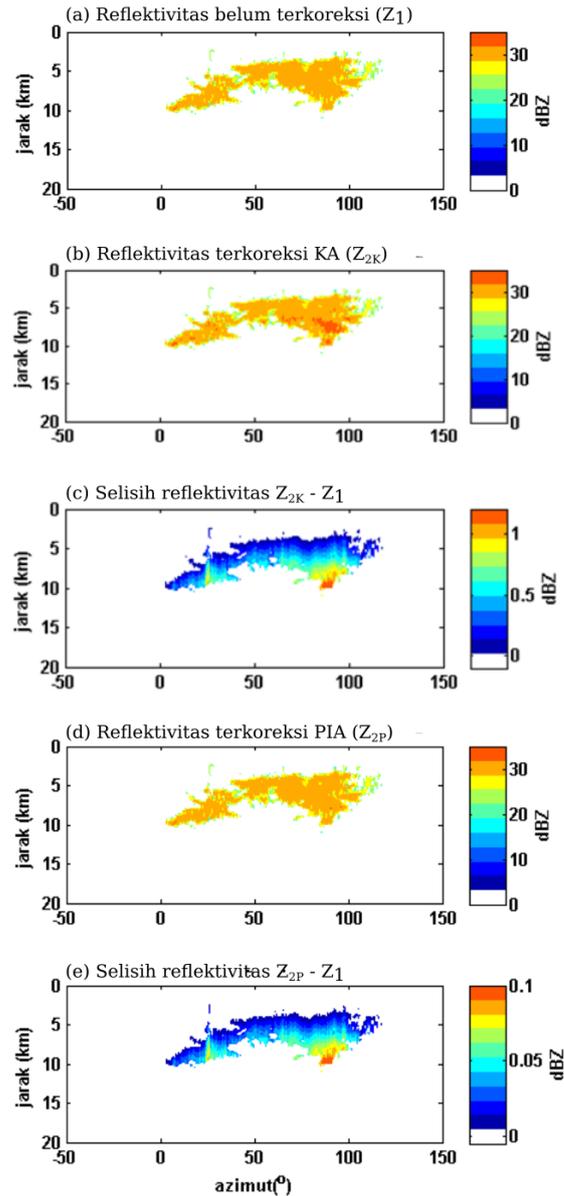
Gambar 7 menunjukkan histogram distribusi nilai reflektivitas satu objek. Tampak bahwa distribusi reflektivitas hasil optimasi PIA hampir sama dengan distribusi reflektivitas sebelum dioptimasi. Sementara itu, dengan KA terdapat perbedaan bentuk distribusi. Optimasi dengan metode KA meningkatkan nilai reflektivitas >30 dBZ. Kasus lain adalah objek pada tanggal 19 April 2017 yang diperlihatkan Gambar 8, menunjukkan dengan lebih jelas perbedaan distribusi reflektivitas antara sebelum dan sesudah diterapkannya KA. Dari kedua gambar ini menunjukkan bahwa peningkatan



Gambar 7. Distribusi reflektivitas pada objek hujan 17 Maret 2017 pukul 11.24 WIB (a) tanpa dikoreksi, (b) koreksi dengan KA, (c) koreksi dengan PIA.



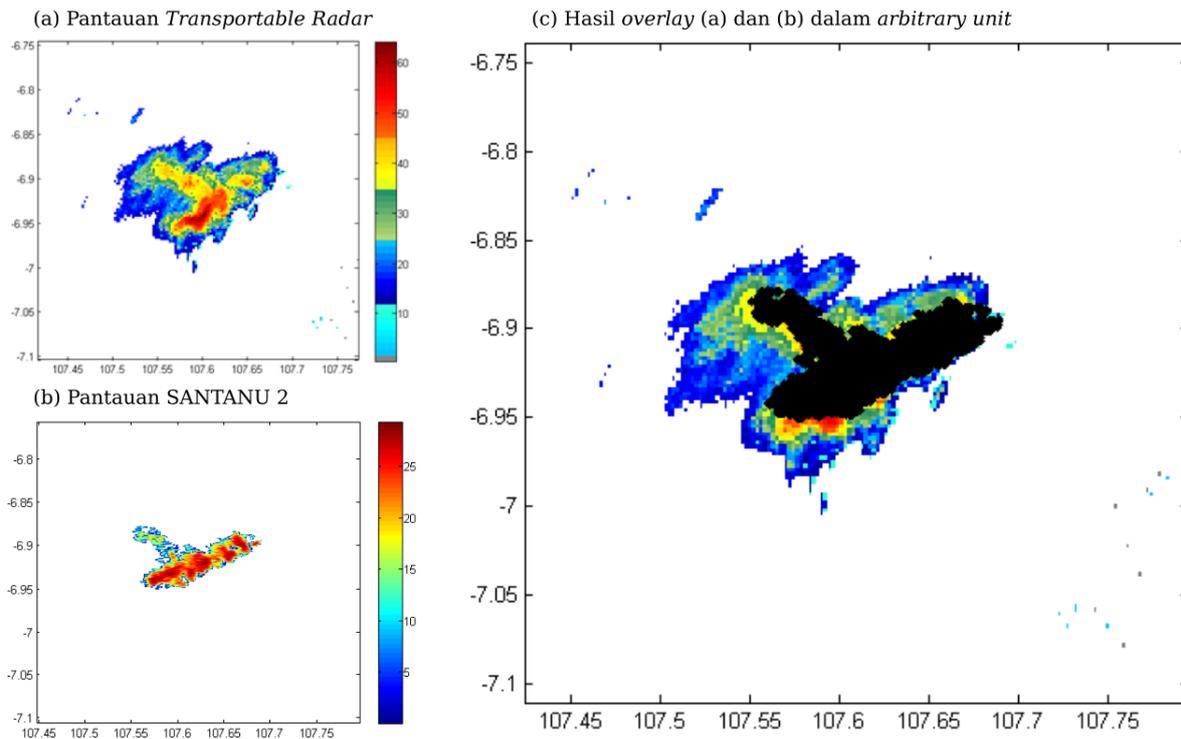
Gambar 8. Distribusi reflektivitas pada objek hujan 19 April 2017 pukul 14.06 WIB.



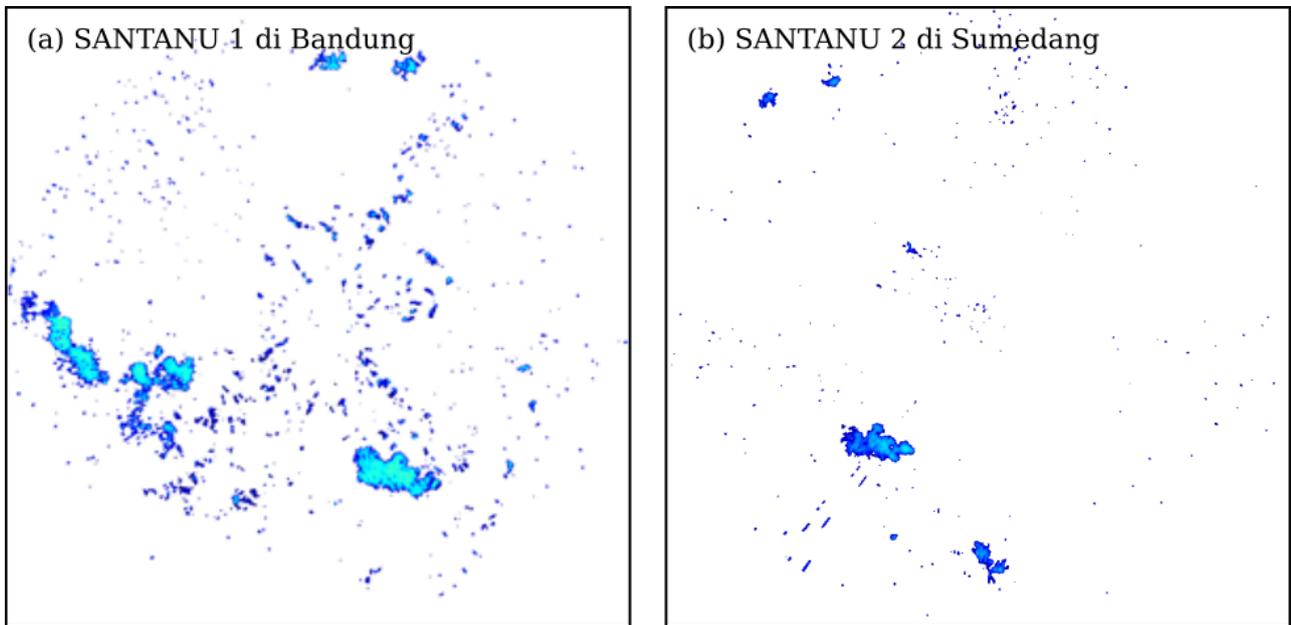
Gambar 9. Kondisi spasial reflektivitas pada objek hujan 17 Maret 2017 pukul 11.36 WIB (a) sebelum koreksi ( $Z_1$ ), (b) setelah koreksi KA, (c) selisih reflektivitas setelah koreksi KA, (d) setelah koreksi PIA, (e) selisih reflektivitas setelah koreksi PIA.

nilai reflektivitas dengan KA lebih besar dibandingkan dengan PIA.

Kondisi spasial sebelum dan sesudah diterapkannya optimasi nilai reflektivitas ditunjukkan oleh Gambar 9. Terlihat bahwa pada jarak yang semakin jauh dari radar, KA dapat meningkatkan nilai reflektivitas lebih baik dibandingkan dengan PIA. Peningkatan reflektivitas KA maksimum sekitar 1 dBZ (Gambar 9 (c)), lebih besar 10 kali dibandingkan dengan PIA (Gambar 9 (e)).



Gambar 10: Perbandingan hasil deteksi radar tanggal 17 Maret 2017 Pukul 11.30 WIB, (a) hasil deteksi *transportable radar*, (b) hasil deteksi SANTANU 2, (c) Hasil *overlay* kedua citra dengan warna hitam adalah hasil SANTANU 2.



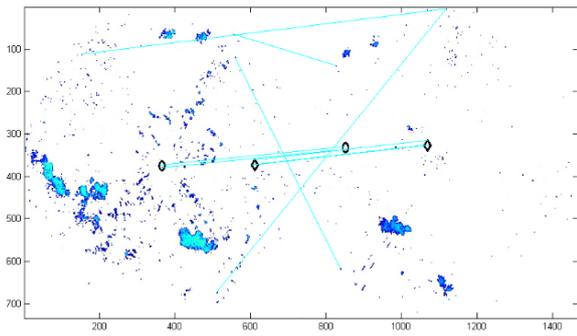
Gambar 11. *Raw image* hasil deteksi SANTANU pada tanggal 3 Mei 2017 pukul 15.36 WIB di Bandung (a) dan Sumedang (b). Posisi radar ada di titik tengah citra.

Dari hasil-hasil yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa optimasi dengan KA lebih baik dibandingkan dengan PIA. Oleh karena itu, untuk analisis selanjutnya, metode KA yang diterapkan.

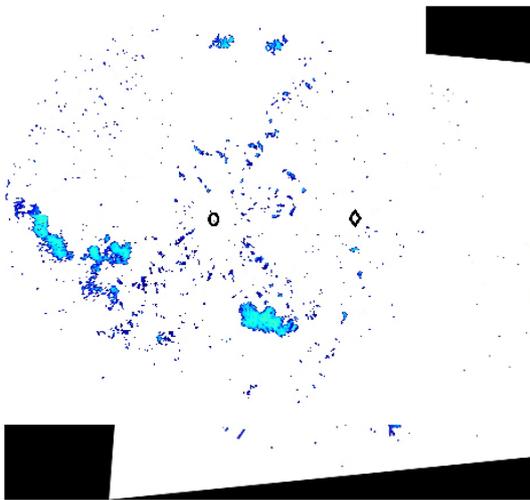
Langkah selanjutnya adalah melakukan perbandingan hasil pantauan SANTANU

dengan data referensi hasil pantauan *transportable radar*. Adapun hasilnya diperlihatkan pada Gambar 10. Bentuk objek yang terdeteksi oleh SANTANU 2 menyerupai bentuk objek yang terdeteksi oleh *transportable radar* untuk reflektivitas di atas 30 dBZ. Hal ini menunjukkan bahwa

hasil deteksi SANTANU mengikuti hasil deteksi *transportable radar* yang terlihat dari



Gambar 12: Proses *image stitching* untuk citra kedua radar tanggal 3 Mei 2017 pukul 15.36 WIB.



Gambar 13. Hasil akhir *image stitching* untuk kasus 3 Mei 2017 pukul 15.36 WIB.

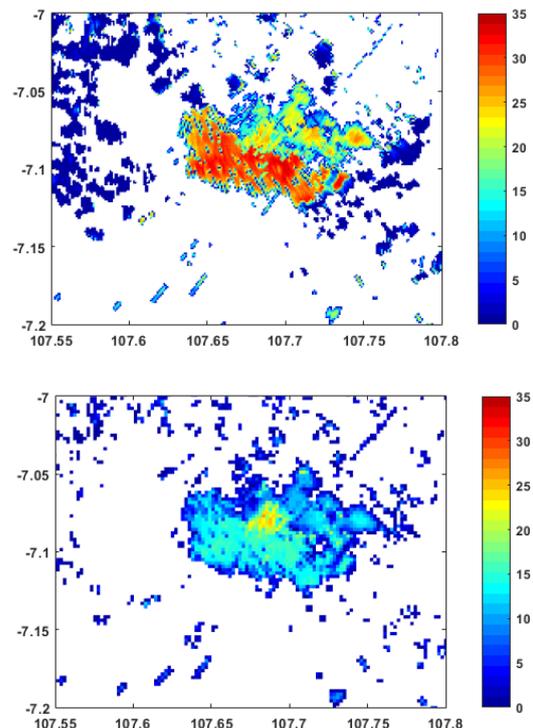
hasil *overlay* pantauan SANTANU terhadap objek pantauan *transportable radar*.

Selanjutnya adalah melakukan proses mosaik dengan mencoba tiga metode, yaitu *image stitching*, perata-rataan, dan skema Cressman. Untuk mosaik dengan *image stitching* digunakan *raw image* hasil deteksi masing-masing SANTANU. Gambar 11 merupakan *raw image* pada tanggal 3 Mei 2017 yang akan digunakan untuk diterapkan *image stitching* dengan SIFT.

Inti dari *image stitching* ini adalah mencari titik-titik yang sama yang menjadi kunci untuk menggabungkan dua gambar menjadi satu kesatuan. Jika menerapkan metode SIFT pada gambar yang diperlihatkan Gambar 11, maka hasil akhirnya adalah hanya Gambar 11 (a) atau

Gambar 11 (b) saja (saling menindih). Dengan menambahkan posisi radar pada kedua gambar, *image stitching* kembali diterapkan. Dalam prosesnya, diperoleh titik-titik yang berkorelasi yang diperlihatkan Gambar 12. Hasil akhir mosaik ditunjukkan oleh Gambar 13. Hasil ini kurang baik karena mengurangi fitur dari SANTANU 2 pada daerah irisannya. Daerah irisan hanya berasal dari deteksi SANTANU 1. Metode SIFT akan menghasilkan citra mosaik yang tidak bagus bila terdapat *speckle noise* yang mengakibatkan kesalahan deteksi dan menjadikan ketidakmiripan kedua citra radar semakin besar (Dellinger *et al.*, 2019). Oleh karena itu, metode ini tidak diterapkan untuk mosaik.

Selanjutnya, diterapkan perata-rataan untuk wilayah yang berkolokasi dan hasilnya ditunjukkan Gambar 14 (a). Data yang digunakan adalah data setelah dilakukan koreksi atenuasi. Hasil yang diperoleh menunjukkan gambar yang tidak menyatu. Kedua gambar terlihat seperti dua gambar yang saling berdekatan, tetapi tidak terpadu dengan baik. Hasil ini juga banyak dipengaruhi oleh *speckle noise*. Sementara



Gambar 14. Hasil mosaik dengan perata-rataan (atas) dan skema Cressman (bawah).

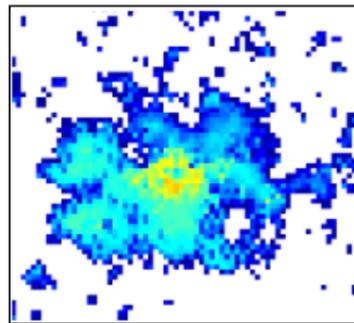
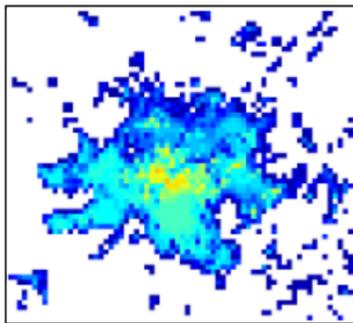
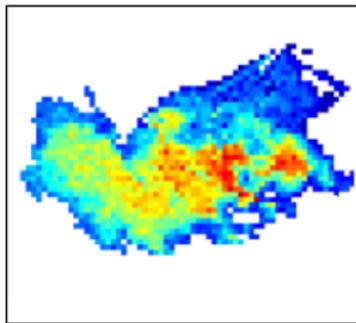
**Hasil Transportable Radar**

**Hasil Mosaik SANTANU**

(a) 5 Mei 2017, 15:30 WIB

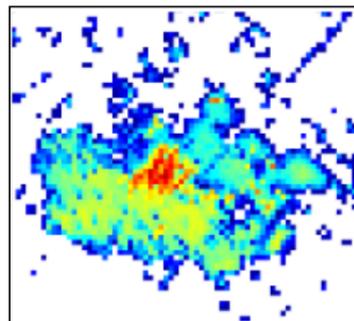
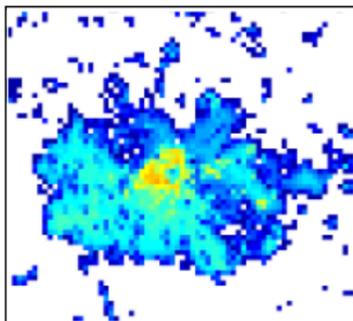
(b) 5 Mei 2017, 15:30 WIB  
SSIM = 0,3342

(c) 5 Mei 2017, 15:32 WIB  
SSIM = 0,3235



(d) 5 Mei 2017, 15:34 WIB  
SSIM = 0,3262

(e) 5 Mei 2017, 15:36 WIB  
SSIM = 0,3294



Gambar 15. Nilai SSIM hasil perbandingan objek deteksi hasil mosaik SANTANU pada beberapa waktu dengan *transportable radar* (sebelum *speckle removal*).

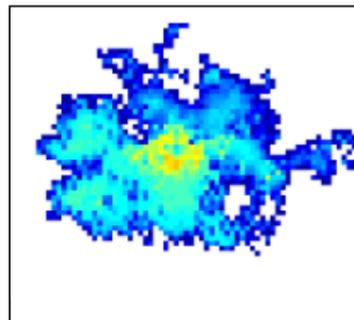
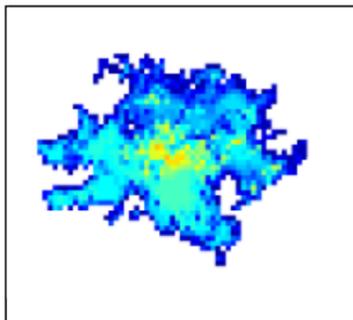
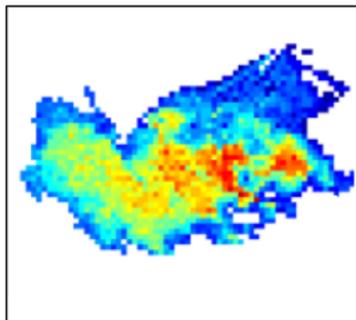
**Hasil Transportable Radar**

**Hasil Mosaik SANTANU**

(a) 5 Mei 2017, 15:30 WIB

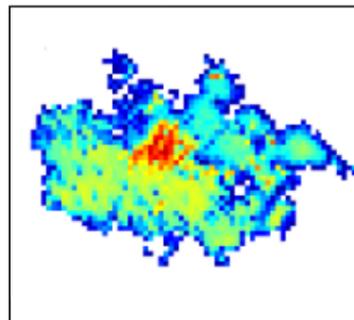
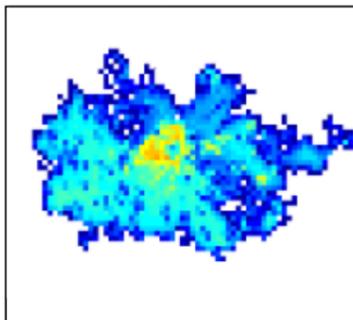
(b) 5 Mei 2017, 15:30 WIB  
SSIM = 0,5161

(c) 5 Mei 2017, 15:32 WIB  
SSIM = 0,4790



(d) 5 Mei 2017, 15:34 WIB  
SSIM = 0,4898

(e) 5 Mei 2017, 15:36 WIB  
SSIM = 0,4960



Gambar 16. Nilai SSIM hasil perbandingan objek deteksi hasil mosaik SANTANU pada beberapa waktu dengan *transportable radar* (setelah *speckle removal*).

itu, pada penggunaan metode Cressman dengan nilai *grid* 240 m × 240 m, hasil mosaik terlihat menyatu dengan baik seperti ditunjukkan dalam Gambar 14 (b) sehingga skema Cressman diterapkan untuk proses mosaik jaringan radar SANTANU.

Komparasi bentuk objek hasil mosaik dengan data *transportable radar* dilakukan dengan menerapkan SSIM. Salah satu hasilnya ditunjukkan oleh Gambar 15. Resolusi temporal data *transportable radar* adalah 10 menit dan SANTANU 2 menit. Satu data dari *transportable radar* dibandingkan dengan beberapa objek hasil mosaik.

Nilai SSIM menunjukkan nilai rata-rata 0,32 (maksimum 1). Nilai kecil ini kemungkinan disebabkan oleh speckle yang banyak terdapat dalam mosaik. Oleh karena itu, perbandingan kembali dilakukan untuk objek tanpa speckle. Hasilnya adalah nilai SSIM meningkat seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 16. Perbandingan juga dilakukan terhadap objek hujan lainnya yang berada pada daerah irisan (gambar tidak ditampilkan). Dari perbandingan SSIM ini secara umum bentuk objek cukup baik.

#### 4. Kesimpulan

Pembuatan citra mosaik jaringan dua buah radar hujan SANTANU telah dilakukan dengan hasil citra mosaik terkoreksi atenuasi yang dibuat menggunakan metode Cressman memperlihatkan area irisan yang lebih menyatu serta mampu mempertahankan fitur-fitur objek dibandingkan dengan dua metode lainnya (images stitching dan metode rata-rata). Namun, waktu pemrosesan mosaik dengan skema Cressman memerlukan waktu ±17 menit, lebih lama dibandingkan dengan metode rata-rata dan *image stitching*. Waktu pemrosesan bergantung pada faktor jumlah grid data dan memori hardware proses data. Perlu dilakukan peningkatan dan perbaikan pada algoritma (*coding*) untuk menerapkan metode ini sehingga waktu yang diperlukan menjadi lebih singkat.

Validasi hasil mosaik dengan data referensi (*transportable radar*) yang dilakukan dengan menerapkan SSIM (kualitas citra berdasarkan struktur, iluminasi,

dan kontras) memperlihatkan nilai rata-rata 0,32. Optimasi hasil mosaik dengan speckle removal mampu meningkatkan nilai SSIM hingga 59%. Validasi hasil mosaik dengan data referensi AWS perlu dilakukan untuk memperoleh hasil yang lebih akurat, tetapi hal ini memerlukan data dengan skala temporal yang cukup panjang.

#### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer LAPAN yang telah mendukung penelitian ini dalam bentuk dana penelitian *inhouse* 2017 dan fasilitas *transportable radar*. Terima kasih juga kami ucapkan kepada para teknisi yang ikut membantu dalam operasional radar.

#### Pernyataan Kontribusi

Seluruh penulis adalah kontributor utama. TS berperan melakukan eksperimen, mengumpulkan data, mengolah data, mengembangkan metode mosaik, dan menulis laporan. GAN berperan mengkoordinir eksperimen, mengontrol kualitas data, melakukan verifikasi dan perbaikan metode mosaik, serta perbaikan laporan. AA melakukan evaluasi dan perbaikan hasil analisis, menyusun alur makalah, dan menulis makalah. Seluruh penulis membaca dan menyetujui isi makalah.

Makalah ini telah melalui proses *blind review* yang dimoderasi oleh Dr. Noersomadi selaku editor.

#### Rujukan

- Lengfeld, K., Clemens, M., Münster, H., & Ament, F. (2014). Performance of High-Resolution X-band Weather Radar Networks the PATTERN Example. *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 4151-4166.
- Trabal, J.M., Colom-Ustariz, J., Cruz-Pol, S., Pablos-Vega, G.A., & Mc Laughlin, D.J. (2013). Remote Sensing of Weather Hazards Using a Low Cost and Minimal Infrastructure Off-The-Grid Weather Radar Network. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 51, 72-82.
- Sinatra, T. & Nugroho, G.A. (2017). Analisis Deteksi Hujan Berbasis Jaringan Radar X-Band di Bandung dan sekitarnya. Dalam *Dinamika Dan Teknologi*

- Atmosfer Benua Maritim Indonesia* (72-82).
- Pedersen, L., Jensen, N.E., & Madsen, H. (2007). Network Architecture for Small X-band Weather Radars: Test Bed for Automatic Inter-calibration and Nowcasting. *The 33rd Conference on Radar Meteorology, Cairns, Australia, 6-10 August*, 12B.2, 1-7.
- Antonini A., Melani S., Corongiu M., Romanelli, S., & Mazza, A. (2017). On the Implementation of a Regional X-Band Weather Radar Network. *Atmosphere*, 8, 25 (20pp).
- Pedersen, L., Jensen, N.E., & Madsen, H. (2010). Calibration of Local Area Weather Radar—Identifying Significant Factors Affecting the Calibration. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33, 2315-2329.
- Delrieu, G., Andrieu, H., & Creutin, J.D. (2012). Quantification of Path-Integrated Attenuation for X- and C-Band Weather Radar Systems Operating in Mediterranean Heavy Rainfall. *Journal Of Applied Meteorology*, 39 (6), 840-850.
- Lengfeld, K., Clemens, M., Merker, C., Münster, H., & Ament, F. (2016). A Simple Method for Attenuation Correction in Local X-Band Radar Measurements Using C-Band Radar Data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33, 2315-2329.
- Zhang, J., Howard, K., Gourley, J.J. (2005). Constructing Three-Dimensional Multiple-Radar Reflectivity Mosaics: Examples of Convective Storms and Stratiform Rain Echoes. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 22, 30-42.
- Daliakopoulos, I.N. & Tsanis, I.K. (2019). A SIFT-Based DEM Extraction Approach Using GEOEYE-1 Satellite Stereo Pairs. *Sensors*, 19, 1123 (18pp).
- Dellinger, F. Delon, J., Gousseau Y., Michel, J., & Tupin, F. (2019). A SIFT-Based DEM Extraction Approach Using GEOEYE-1 Satellite Stereo Pairs. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2012*, 3478-3481.
- Wang, Z., Bovik, A.C., Sheikh, H.R., & Simoncelli, E.P. (2004). Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13 (4), 600-612.