

MODIFIKASI *DIGITAL ELEVATION MODEL* (DEM) CITRA RESOLUSI TINGGI MENGGUNAKAN FUSI INTERFEROMETRI SAR DAN STEREOSAR BERBASIS FAKTOR PEMBOBOTAN

(DEM MODIFICATION USING FUSION OF SAR INTERFEROMETRI AND STEREOSAR BASED ON WEIGHTING FACTOR)

**Haris S. Dyatmika¹, Rahmat Arief¹, Dodi Sudlana², Shadiq Ali¹,
Rachmat Maulana¹, dan Marendra Eko Budiono¹**

¹Pusat Teknologi dan Data Peningeraan Jauh, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

²Departemen Teknik Elektro, Universitas Indonesia

e-mail: haris.suka@lapan.go.id

Diterima 19 November 2018; Direvisi 5 Desember 2018; Disetujui 16 Desember 2018

ABSTRACT

SAR satellite sensors are capable to measure elevation of the earth surface using interferometry (InSAR) or radargrammetry (StereoSAR) methods. The InSAR method utilizes phase value from SAR images, while the StereoSAR uses amplitude value to produce elevation of the earth surface. Both methods have advantages and disadvantages on each own. Problems with low accuracy on DEM generated using InSAR occur on shadow and layover area, while in the second method (StereoSAR) the problem arise when cross correlation between the two images have low value. This paper proposes a technique to combine InSAR and StereoSAR methods to generate DEM using high resolution SAR images. A pair of TerraSAR-X or TanDEM-X images with a 21 degree incidence angle are used in this study and processed using the InSAR method and another pair of images at an angle of 21 degrees and 41 degrees using the StereoSAR method in Bandung and surrounding areas. The experimental results show that the fusion DEM of the two methods have better accuracy and decrease the absolute error both from InSAR and StereoSAR technique methods that separately around 3.48 m and 1.80 m

Keywords: *Fusion, DEM, InSAR, StereoSAR*

ABSTRAK

Sensor satelit SAR mampu mengukur elevasi permukaan bumi menggunakan metode interferometri (InSAR) atau radargrametri (StereoSAR). Metode InSAR memanfaatkan fase dari citra SAR, sedangkan StereoSAR menggunakan nilai amplitudo untuk menghasilkan elevasi permukaan bumi. Kedua metode mempunyai kelebihan dan kekurangan. Beberapa permasalahan adalah akurasi rendah DEM menggunakan InSAR citra SAR di area bayangan dan singgahan, sedangkan pada metode kedua, permasalahan muncul jika korelasi silang antara kedua citra rendah. Makalah ini mengajukan metode penggabungan citra DEM InSAR dan StereoSAR untuk pembuatan citra DEM baru menggunakan citra SAR resolusi tinggi. Pasangan citra TerraSAR-X atau TanDEM-X dengan sudut datang 21 derajat digunakan dalam penelitian ini, diolah menggunakan metode InSAR dan sepasang citra dengan sudut masing-masing 21 derajat dan 41 derajat menggunakan metode StereoSAR di area Bandung dan sekitarnya. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa DEM fusi kedua metode tersebut mempunyai akurasi yang lebih baik, dengan kesalahan absolut lebih kecil dari pada masing-masing metode InSAR dan StereoSAR, secara terpisah yaitu meningkat sebesar 3.48 m dan 1.80 m.

Kata kunci: *Fusi, DEM, InSAR, StereoSAR*

1 PENDAHULUAN

Digital Elevation Model (DEM) yang dibuat dari citra *Synthetic Aperature Radar* (SAR) merupakan hasil karya cipta terbaik dalam sejarah penginderaan jauh hingga saat ini. Hal ini ditunjukkan dengan sering digunakannya DEM dari ekstraksi SAR dalam proses rektifikasi pada pengolahan data penginderaan jauh.

Penggunaan DEM sering kita temui pada banyak aplikasi penginderaan jauh, seperti pembuatan peta dasar, pembuatan peta relief, ekstraksi parameter *terrain* untuk geomorfologi, pemodelan aliran air untuk hidrologi, pemodelan pergerakan permukaan bumi, *render* dari visualisasi 3 dimensi, analisis dari *line of sight*, pemantauan pertanian dan kehutanan yang akurat, desain rekayasa infrastruktur, dan lain lain.

Kualitas DEM ditunjukkan pada akurasi vertikal dan horisontal pada tiap piksel (akurasi absolut) dan akurasi sesuai dengan morfologi permukaan (akurasi relatif). Beberapa faktor yang memengaruhi kualitas dari produk DEM adalah: kerapatan jumlah sampel saat memperoleh data elevasi, ukuran piksel, korelasi dari sumber data, kondisi *terrain* permukaan, algoritma pembentukan data elevasi dengan interferometri, radargrametri, kliometri, morfometri, algoritma interpolasi (*linear, relax, kriging*), resolusi vertikal, dan kualitas dari data *masking* seperti garis pantai, danau, sungai, awan serta salju.

DEM diturunkan dari informasi fase menggunakan metode pengolahan interferometri dari 2 citra satelit radar yang diperoleh dari dua lintasan orbit

yang sama agar perbedaan geometri satelit sangat kecil (atau *baseline* kecil sekitar 50-200 m) dan perbedaan waktu sekecil mungkin. Idealnya akuisisi dilakukan secara simultan untuk mengurangi perubahan permukaan sekecil mungkin, seperti akuisisi DEM dari satelit SRTM yang dilengkapi 2 antena penerima sepanjang 60 m atau tandem 2 satelit dari TerraSAR-X dan TanDEM-X.

Metode lain untuk mendapatkan DEM dapat diperoleh dari pasangan citra StereoSAR menggunakan metode korelasi citra digital, yang disebut metode radargrametri. Pasangan citra tersebut dapat diakuisisi dengan sudut datang yang berbeda serta lintasan orbit yang berbeda.

Metode InSAR maupun radargrametri yang digunakan untuk memperoleh DEM, masing-masing memiliki kelemahan. Pada metode InSAR, permasalahan yang sering muncul adalah adanya distorsi pada citra SAR seperti *layover, foreshortening* dan *shadow*, serta koherensi dari 2 fase citra yang rendah pada saat proses *phase-unwrapping*. Hal ini dikarenakan citra SAR diakuisisi dengan melihat ke samping secara geometri. Di lain pihak metode radargrametri, permasalahan muncul saat korelasi silang pada dua citra bernilai rendah, rendahnya tingkat kecocokan pada titik ikat serta gangguan *speckle* pada operasi pencocokan kedua citra.

Masing-masing produk DEM dari kedua metode memiliki tingkat keakuratan dan karakteristik yang bervariasi serta memiliki kelebihan dan kekurangan. Keragaman karakteristik dalam mendapatkan DEM ini

mendorong adanya teknik yang menarik, yaitu penggabungan (fusi) dua metode untuk saling melengkapi kekurangan satu sama lain.

Beberapa metode fusi telah dilakukan dalam pembuatan DEM, seperti: kombinasi DEM optik dan SAR (Hoja & d'Angelo, 2009), konstruksi model gabungan StereoSAR dan InSAR yang dibangun dalam koordinat sistem yang sama serta penyesuaian persamaan *Range Doppler* dan fase (Zhao et al., 2015). Penggabungan dua metode untuk menekan artefak yang muncul pada proses InSAR dari data ERS1 dan Radarsat1 (Crosetto & Pérez, 2000).

Makalah ini mengajukan metode penggabungan InSAR dan StereoSAR dalam pembuatan DEM menggunakan citra SAR resolusi tinggi dengan menentukan pembobotan dari kelerengan, koherensi, distorsi citra, korelasi silang, dan proses pencocokan titik ikat untuk saling melengkapi masing-masing kelemahan pada kedua metode serta mendapatkan akurasi ketinggian yang lebih baik.

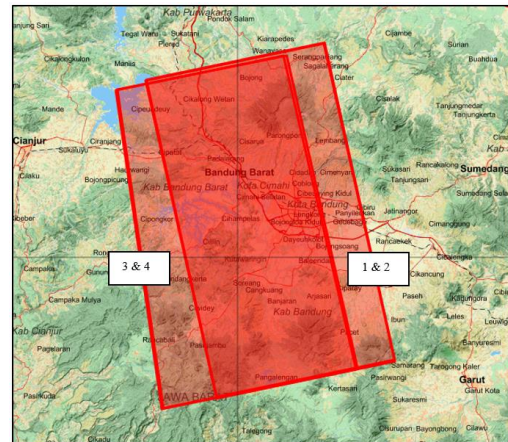
2 METODOLOGI

2.1 Data

Data pada studi ini menggunakan citra satelit TerraSAR-X/TanDEM-X yang membawa sensor X-band SAR dengan frekuensi tinggi serta dapat dioperasikan dalam mode pencitraan fleksibel. Data diproduksi dalam format *Single-look Slant-range Complex* (SSC) pada mode StripMap dengan polarisasi HH di daerah sekitar Bandung.

Gambar 2-1 menunjukkan data penelitian secara spasial. Pasangan DEM interferometri menggunakan data dengan sapuan spasial hampir sama. Di

lain pihak, pasangan DEM radargrametri menggunakan data dengan spasial yang sedikit berbeda sehingga akan menghasilkan DEM hanya pada daerah irisan kedua data.



Gambar 2-1: Data yang digunakan untuk studi

Pasangan citra TerraSAR-X dipilih sesuai metode interferometri SAR dan radargrametri untuk pembuatan DEM masing-masing. Sesuai data TerraSAR-X yang tertera pada Tabel 2-1, terdapat 2 pasang data untuk metode interferometri, yaitu dengan sudut datang sekitar 21° dan 42°. Perbedaan dari kedua sudut datang tersebut menentukan distorsi geometri seperti *layover*, *foreshortening*, dan *shadow*. Semakin besar sudut datang, pada area yang tinggi (seperti pengunungan atau bangunan tinggi) akan menyebabkan distorsi geometri pada objek semakin besar sehingga pasangan untuk interferometri dipilih dengan sudut datang keduanya yang lebih kecil yaitu 21.24° dan 21.32°. Pasangan ini diakuisisi pada *repeat pass* orbit yang memiliki beda waktu akuisisi 11 hari. Dengan syarat di atas, diperoleh

Tabel 2-1: SPESIFIKASI CITRA TERRASAR-X DAN TANDEM-X

No	Product Name	Mission	Incidence Angle	Acquisition Date	Product Type	Polarization	Pass
1	TDX1_SAR	Stripmap	42,72	12 Juni 2018	SSC	HH	Ascending
2	TSX1_SAR	Stripmap	42,75	23 Juni 2018	SSC	HH	Ascending
3	TDX1_SAR	Stripmap	21,24	18 Juni 2018	SSC	HH	Ascending
4	TSX1_SAR	Stripmap	21,32	07 Juni 2018	SSC	HH	Ascending

Sumber: Hasil pengolahan data

baseline jarak dan waktu yang pendek. Kondisi ini cocok untuk pembuatan DEM interferometri.

Pasangan citra untuk metode radargrametri dipilih dengan syarat adanya perbedaan sudut datang yang cukup besar, sehingga diperoleh kondisi membentuk citra stereo dari kedua citra SAR tersebut. Kualitas DEM dari stereo-radargrametri bergantung pada rasio ketinggian atau dari sudut perpotongan dari pasangan citra (Leberl, 1990). Untuk memperoleh hasil geometri yang baik, sudut perpotongan dari kedua citra harus mempunyai paralaks yang cukup untuk mendapatkan informasi ketinggian. Namun, untuk mendapatkan visualisasi yang baik, perbedaan sudut yang kecil dibutuhkan (Yu *et al.*, 2010). Perbedaan sudut yang optimal antara kedua citra berada sekitar 10-20° (d'Ozouville *et al.*, 2008) atau sekitar 15-25° (Hennig *et al.*, 2010). Perbedaan waktu akuisisi menentukan tingkat korelasi silang kedua citra. Idealnya kedua citra tersebut diakuisisi pada saat yang sama. Pilihan pasangan pada penelitian ini memiliki perbedaan sudut datang masing masing 21.23° dan 42.72° dengan perbedaan waktu akuisisi sedekat mungkin, yaitu 6 hari, sehingga proses radargrametri bisa optimal dilakukan.

Proses fusi dilakukan dengan menggunakan data hasil pembuatan

DEM dari metode InSAR dan radargrametri.

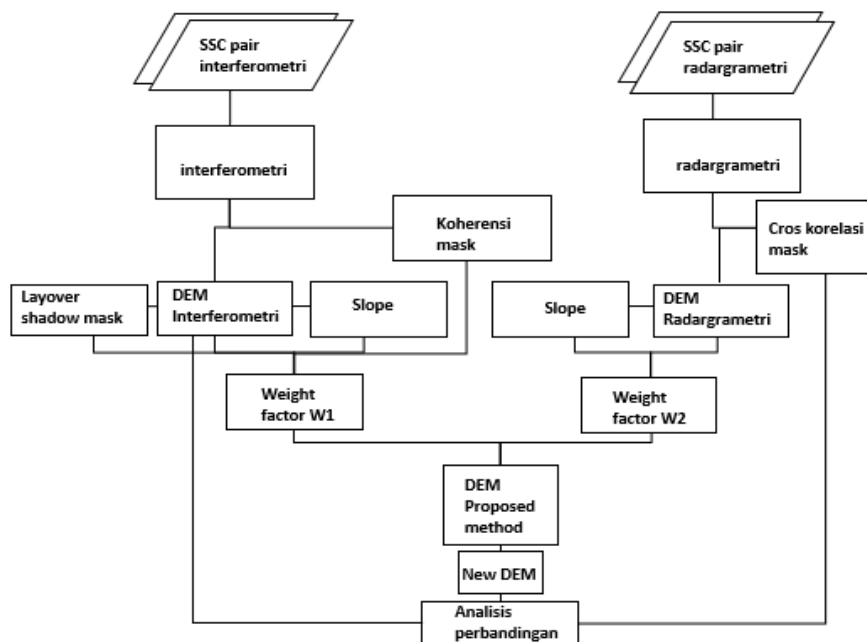
2.2 Metode Penelitian

Langkah-langkah yang digunakan untuk mengolah fusi DEM secara umum dapat dilihat pada Gambar 2-2. Gambar tersebut memaparkan kerangka penelitian mulai dari penggunaan data penelitian, urutan pembuatan masing-masing DEM, faktor pembobotan, serta proses fusi sampai dengan analisis perbandingan hasil DEM.

2.3.1 Metode Interferometri SAR

Metode Interferometri SAR untuk mendapatkan DEM dilakukan melalui tahapan: co-registrasi dari kedua data dengan akurasi sub-piksel, spektral filtering, dan pembuatan interferogram. Setelah mendapatkan interferogram, dilakukan proses pengurangan *phase ramp* yang sesuai dengan bumi datar serta pembukaan fase (*phase unwrapping*), selanjutnya konversi fase ke ketinggian medan, dan diakhiri dengan *geocoding*.

Iluminasi dan penerimaan sinyal ke arah samping menyebabkan karakteristik geometri dan radiometri tertentu dalam citra SAR. Di daerah pegunungan, efek bayangan (*shadow*) dan singgahan (*layover*) memengaruhi



Gambar 2-2: Diagram alir eksperimen fusi DEM

DEM yang dihasilkan. Efek bayangan disebabkan karena adanya area yang tidak terkena sinar radar akibat tertutup oleh geometri yang lebih tinggi daripada area tersebut (misalnya gunung dan bangunan), sehingga tidak ada sinar radar yang dikembalikan. Semakin besar sudut kejadian, maka efek bayangan juga semakin besar. Di sisi lain singgahan disebabkan oleh lereng yang lebih curam daripada sudut kejadian radar (misalnya pada sisi depan gunung, bangunan). Lereng yang cukup curam mengakibatkan proyeksi terbalik pada *slant range* antara puncak dan bagian bawah objek (yang berada di depan puncak). Puncak objek, diikuti area lereng akan melapisi (*lays over*) area di depannya sampai bagian bawah objek.

2.3.2 Metode Stereo SAR

Ekstraksi DEM menggunakan metode radargrametri dilakukan dengan stereo *image matching* pada kedua citra. Proses *image matching* diawali dengan mendefinisikan gambar primer dan gambar sekunder. Kemudian dilanjutkan oleh tahap co-registrasi yang dibantu oleh data DEM lainnya. Pada tahap ini, ambang batas korelasi-silang dan resolusi spasial ditetapkan pada angka tertentu. Selanjutnya *ground control points* digunakan dalam proses *shift refinement* and *flattening stage*. Data elevasi didapatkan setelah konversi pergeseran (*shift*) ke ketinggian dilakukan.

2.3.3 Pembobotan pada peta kesalahan tinggi

Keakuratan DEM yang diturunkan secara regional dan tidak memiliki satu nilai akurasi untuk seluruh *scene* menarik untuk dilihat karena kualitas DEM yang berasal dari data satelit bervariasi dalam ketergantungan kecuraman medan dan kelas tutupan lahan. Selanjutnya pada metode fusi DEM digunakan nilai pembobotan dari peta kesalahan tinggi untuk setiap DEM untuk memberikan hasil yang paling akurat. Pembuatan peta kesalahan

tinggi sebagai prasyarat sangat penting untuk dapat menentukan nilai pembobotan tinggi atau rendah.

Peta kesalahan tinggi dapat diproduksi dengan mempertimbangkan berbagai sumber kesalahan. Distorsi geometri citra seperti singgahan (Bolter *et al.*, 1998) (Rossi *et al.*, 2014) dan bayangan (Prasath & Haddad, 2014) diberikan nilai pembobotan rendah.

Tingginya koherensi pada kedua citra menunjukkan tidak adanya perubahan objek, sehingga akurasi nilai elevasi lebih tinggi. Sebaliknya, koherensi yang rendah menunjukkan rendahnya akurasi.

Daftar pembobotan dari peta kesalahan ditampilkan di Tabel 2-2.

Tabel 2-2: KOMPONEN PEMBOBOTAN

Bayangan/singgahan	Nilai pembobotan
kosong	0
Data	1

Nilai kelerengan	Nilai pembobotan
0 – 10 %	1
10 – 20 %	0.8
20 – 30 %	0.6
30 – 40 %	0.4
>= 40 %	0

Nilai koherensi	Nilai pembobotan
1 – 0.8	1
0.8 – 0.6	0.8
0.6 – 0.4	0.6
0.4 – 0.2	0.4
0.2 – 0	0.2

Nilai korelasi silang	Nilai pembobotan
1 – 0.8	1
0.8 – 0.6	0.8
0.6 – 0.45	0.6
< 0.45	0

Sumber: Hasil pengolahan data

2.3.4 Metode Fusi

Suatu area pada koordinat yang sama akan mendapatkan nilai elevasi baru dari penggabungan metode InSAR dan StereoSAR. Ketersediaan beberapa pengukuran dari elevasi pada titik yang sama, akan meningkatkan akurasi elevasi dari DEM fusi dari pada DEM individu (Reinartz *et al.*, 2005).

Metode fusi dilakukan dengan melakukan pembobotan pada citra DEM hasil InSAR dan StereoSAR sebagaimana yang telah dijelaskan pada bagian 2.3.3. tentang pembobotan kesalahan tinggi. Masing-masing DEM hasil InSAR dan StereoSAR dihitung nilai bobotnya untuk setiap piksel. Kemudian, masing-masing bobot hasil DEM InSAR dan StereoSAR dikalikan dengan nilai masing-masing elevasi pada target area yang kemudian dirata-ratakan untuk mendapatkan nilai elevasi baru yang merupakan hasil penggabungan metode InSAR dan StereoSAR.

Secara sederhana, langkah-langkah metode fusi adalah sebagai berikut:

1. Set nilai latar, jika tidak ada DEM
2. Set nilai pembobotan
3. Set nilai ketinggian, jika pada piksel tersebut hanya 1 DEM
4. Set nilai ketinggian rata-rata dengan pembobotan

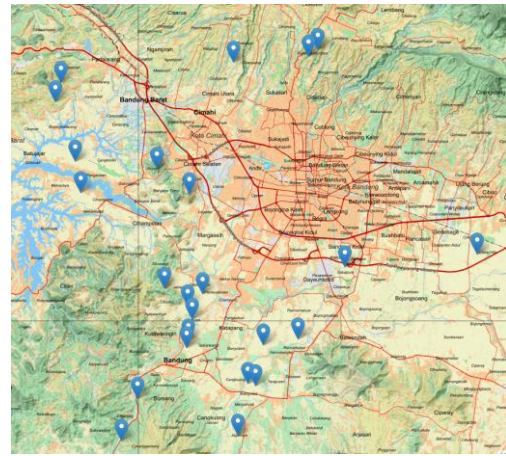
$$h_{out} = \frac{\omega_1 h_1 + \omega_2 h_2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (1)$$

Di mana:

- h_1 nilai elevasi dari DEM 1
- h_2 nilai elevasi dari DEM 2
- ω_1 nilai pembobotan dari elevasi DEM1
- ω_2 nilai pembobotan dari elevasi DEM2

2.3.5 Uji Akurasi Ketinggian

Hasil DEM pada metode InSAR, StereoSAR serta penggabungan dari kedua metode tersebut kemudian diuji nilai ketinggiannya dengan hasil observasi lapangan menggunakan GPS Geo 7x yang terletak di 22 titik yang tersebar di area studi. Titik persebaran data lapangan ini dapat dilihat pada Gambar 2-3. Observasi dilakukan pada waktu yang hampir berdekatan dengan waktu akuisisi citra, sehingga nilai dari titik uji masih relevan untuk dijadikan referensi citra. Presisi dari pengukuran tersebut dari 20 cm sampai pada orde millimeter.



Gambar 2-3: Titik GPS sebagai referensi nilai ketinggian di area studi

Perbandingan hasil DEM yang telah dibuat baik metode InSAR, radargrametri, maupun metode fusi yang diajukan dianalisis melalui proses *assessment* akurasi menggunakan kesalahan (*error*) absolut, *Root Mean Square Error* (RMSE), dan *Linear Error* (LE95) menurut persamaan (Du et al., 2015):

$$|Error Z| = \frac{\sum |Z_{gps} - Z_i|}{n} \quad (2)$$

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum (Error Z)^2}{n}} \quad (3)$$

$$LE95 = 1.96 * RMSE_z \quad (4)$$

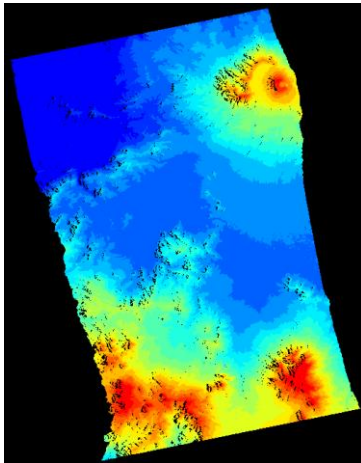
Di mana:

- Z_i Nilai ketinggian dari eksperimen DEM
- Z_{gps} Nilai ketinggian dari pengukuran GPS
- n Banyaknya titik pengukuran

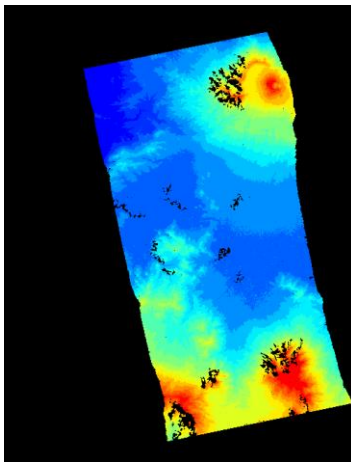
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Ekstraksi DEM dilakukan menggunakan kedua teknik di atas dengan *multilook* pada arah *azimuth* 5x dan *slant range* 5x untuk mereduksi *speckle* pada pengolahan radargrametri, sehingga diperoleh elevasi DEM dengan resolusi spasial 12 meter. Cakupan data yang digunakan pada penelitian ini sebesar 30x50 km di daerah sekitar Bandung.

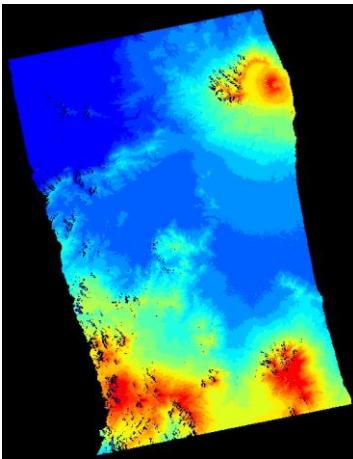
Gambar 3-1 (a) dan (b) menunjukkan hasil ekstraksi DEM memiliki bercak



(a)



(b)

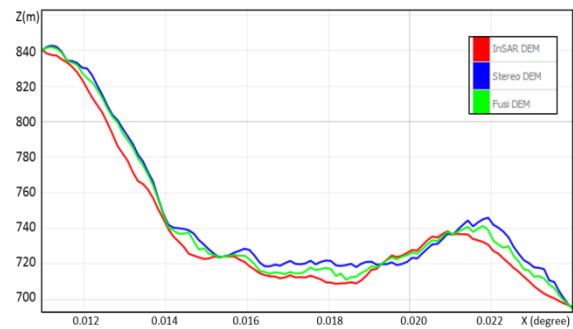


(c)

Gambar 3-1: Ketinggian dari DEM dari (a) InSAR (b) StereoSAR (c) New DEM/ fusi

menandakan pada daerah tersebut tidak dapat diekstraksi nilai elevasinya. Nilai elevasi yang tidak didapatkan disebabkan oleh korelasi silang maupun koherensi yang rendah, baik pada metode StereoSAR maupun InSAR. Metode fusi antara InSAR dan StereoSAR dilakukan untuk menutupi bercak yang terbentuk serta untuk mendapatkan nilai elevasi yang lebih akurat. Hasil DEM fusi InSAR dan StereoSAR dapat dilihat pada Gambar 3-1 (c). Hasil tersebut merupakan penggabungan dari dua DEM (InSAR dan StereoSAR). Pada gambar tersebut dapat dilihat adanya pengurangan bercak, hal ini terjadi karena kedua DEM saling mengisi kekosongan elevasi yang menjadi penyebab bercak-bercak pada Gambar 3-1 (a) dan (b). Namun hasil fusi DEM tersebut ternyata masih terdapat sedikit bercak yang menandakan bahwa kedua DEM sama-sama tidak keluar nilai elevasinya. Untuk mengisi kekosongan yang terakhir ini bisa dilakukan dengan cara interpolasi.

Gambar 3-2 menunjukkan profil plot linier dari ketiga DEM. Plot diambil pada area yang ada nilai elevasi di ketiga hasil DEM, sehingga plotnya dapat dibandingkan. Warna biru menunjukkan plot DEM dengan metode InSAR, merah menggunakan StereoSAR, dan hijau adalah hasil Fusi DEM keduanya. Dengan sumbu x adalah jarak dari pengambilan plot dan sumbu y adalah nilai elevasi.



Gambar 3-2: Perbandingan profil plot ketinggian tiga simulasi DEM

Dari persamaan (1) (bagian 2.3.4) tampak bahwa hasil fusi kedua DEM tersebut akan menunjukkan hasil yang nilainya selalu di antara nilai elevasi DEM InSAR dan StereoSAR, yang kemudian dibuktikan pada Gambar 3-2.

Kecenderungan plot DEM Fusi ke DEM InSAR ataupun StereoSAR bergantung pada besarnya pembobotan w_1 dan w_2 yang sebelumnya telah dijelaskan di bagian 2.3.3.

Hasil uji akurasi ketinggian pada DEM hasil penggabungan (fusi) metode InSAR dan StereoSAR memiliki nilai kesalahan absolut sebesar 3.33 meter dengan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 4.69 meter. Sebagaimana yang dituangkan pada Tabel 3-1, nilai kesalahan absolut dari uji akurasi ketinggian pada metode InSAR dan StereoSAR sebesar 6.81 meter dan 5.13 meter dengan RMSE sebesar 8.38 meter dan 6.76 meter. Terakhir nilai LE95 hasil InSAR, StereoSAR, dan Fusi adalah 46.42, 13.24, dan 9.19 meter. Hal ini menunjukkan adanya perbaikan akurasi pada ketiga *assessment* akurasi ketinggian terhadap masing-masing metode (InSAR dan StereoSAR) saat dilakukan metode penggabungan (fusi) terhadap kedua metode tersebut.

Tabel 3-1: Uji akurasi ketinggian dibandingkan dengan data lapangan (GPS *Geodetic*)

	Kesalahan absolut [m]	RMSE [m]	LE95 [m]
InSAR DEM	6.81	8.38	16.42
Stereo DEM	5.13	6.76	13.24
Fusi DEM	3.33	4.69	9.19

Sumber: Hasil pengolahan data

4 KESIMPULAN

Pembuatan DEM menggunakan penggabungan metode InSAR dan StereoSAR menggunakan data TerraSAR-X/ TanDEM-X dengan melakukan pembobotan pada peta kesalahan tinggi dari hasil DEM InSAR dan StereoSAR telah berhasil dilakukan. Hasil DEM penggabungan metode InSAR dan StereoSAR mempunyai resolusi spasial sebesar 12m serta menunjukkan perbaikan nilai akurasi ketinggian absolut sekitar 2 dan 1.5 kali dari metode InSAR dan StereoSAR.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis berterima kasih kepada Pusat Teknologi dan Data Penginderaan Jauh - LAPAN yang telah menyediakan data TerraSAR-X dan TanDEM-X. Penelitian didanai oleh Kementerian Riset, Teknologi, dan Perguruan Tinggi dengan Program Insentif Riset Sistem Inovasi Nasional Gelombang I Tahun Anggaran 2018 Nomor 11/INS-1/PPK/E4/2018.

DAFTAR RUJUKAN

- Bolter, R., Gelautz, M., & Leberl, F. (1998). *Geocoding in SAR Layover Areas*. In EUSAR '98 (pp. 481-484). Germany: VDE Verlag GmbH.
- Crosetto, M., & Pérez, F. (2000). *Radargrametri and SAR interferometri for DEM generation: validation and data fusion*. SAR Workshop: CEOS Committee on Earth Observation Satellites, 367-372. Toulouse.
- d'Ozouville, N., Deffontaines, B., Benveniste, J., Wegmüller, U., Violette, S., & de Marsily, G. (2008). *DEM generation using ASAR (ENVISAT) for addressing the lack of freshwater ecosystems management*. *Remote Sensing of Environment*, 112(11), 4131-4147. Santa Cruz Island, Galapagos. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.02.017>
- Du, X., Guo, H., Fan, X., & Zhu, J. (2015). *Vertical accuracy assessment of freely available digital elevation models over low-lying coastal plains*. *International Journal of Digital Earth*. <https://doi.org/10.1080/17538947.2015.1026853>
- Hennig, S. D., Koppe, W., Kiefl, N., & Janoth, J. (2010). *Digital Elevation Modeling Using TerraSAR-X Stereo Pairs*. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGRASS). Hawaii.
- Hoja, D. & d'Angelo, P. (2009). *Analysis of DEM combination methods using high resolution optical stereo imagery and interferometric SAR data*. ISPRS HighResolution Earth Imaging for Geospatial Information Hannover. 02-05. Hanover.
- Leberl, F. W. (1990). *Radargrammetric image processing*. Artech House. Norwood.
- Prasath, V. B. S., & Haddad, O. (2014). *Radar shadow detection in SAR*

- images using DEM and projections*. J. Appl. Remote Sens. 8(1). 083628.
<https://doi.org/10.1117/1.JRS.8.083628>
- Reinartz, P., Müller, R., Hoja, D., Lehner, M., & Schroeder, M. (2005). *Comparison and fusion of DEM derived from SPOT-5 HRS and SRTM data and estimation of forest heights*. European Association of Remote Sensing Laboratories [Ed.]: Proceedings of the EARSeL Workshop on 3D Remote Sensing. Porto, Portugal.
- Rossi, C., Eineder, M., & Fritz, T. (2014). *Detecting Building Layovers in a SAR Interferometric Processor Without External References*. In EUSAR 2014; 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar (pp. 1–4). Berlin.
- Yu, J. H., Li, X., Ge, L., Chang, H., & Systems, S. I. (2010). *Radargrametri and Interferometri Sar for Dem*. 15th Australasian Remote Sensing & Photogrammetry Conference, 1212–1223. Alice Springs.
- Zhao, Z., Zhang, J. X., Duan, M. Y., Huang, G. M., & Yang, S. C. (2015). *Combined DEM extraction method from StereoSAR and InSAR*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 40(7W4). 231–234. Hawaii.
<https://doi.org/10.5194/isprsarchive-s-XL-7-W4-231-2015>

