

PENGGUNAAN *GENERIC ATMOSPHERIC CORRECTION ONLINE SERVICE FOR INSAR (GACOS)* PADA PEMANTAUAN PENURUNAN MUKA TANAH DI KOTA SEMARANG METODE *PERSISTENT SCATTERER INTERFEROMETRIC SYNTHETIC APERTURE RADAR*

Reyhan Azeriansyah¹, Harintaka¹

¹ Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada
Jalan Grafika No. 2, Bulaksumur, Yogyakarta. Indonesia 55281 Telp./Faks: (0274) 520226,
e-mail: reyhanazeriansyah@mail.ugm.ac.id

(Diterima 24 April 2019, Disetujui 30 Juni 2019)

ABSTRAK

Wilayah pesisir merupakan tempat yang potensial dalam bermukim dan memanfaatkan sumber daya alam. Kemudahan akses dan daerah yang berpotensi untuk dikelola sehingga sebagian besar permukiman padat penduduk berada di wilayah tersebut. Salah satu akibat dari aktivitas dapat dilihat pada wilayah pesisir seperti Kota Semarang yang mengalami penurunan muka tanah yang disebabkan berbagai faktor alam dan buatan manusia. Metode pengamatan yang sering dilakukan untuk fenomena ini adalah pengamatan GNSS. Interval jarak yang terlalu jauh antar stasiun menyebabkan beberapa area tidak tercapuk dalam pengamatan penurunan muka tanah dengan pengamatan GNSS *receiver*. Salah satu solusi yang dapat digunakan adalah dengan memanfaatkan teknologi *Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)* secara multi-temporal yang disebut *Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR)*. PS-InSAR memiliki permasalahan berupa kesalahan troposfer yang menyebabkan percepatan atau pelambatan sinyal pada sensor SAR saat melakukan akuisisi. Metode koreksi troposfer *Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR (GACOS)* yang digunakan pada metode PS-InSAR akan dapat mengeliminasi efek troposfer pada masing-masing citra sehingga kesalahan dapat diminimalkan dan mengoptimalkan kerja metode PS-InSAR. Berdasarkan hasil PS-InSAR sebelum dan sesudah terkoreksi menunjukkan bahwa wilayah di Kota Semarang yang mengalami penurunan muka tanah terbesar adalah Kecamatan Genuk, Kecamatan Pedurungan, Kecamatan Semarang Timur dan Kecamatan Semarang Utara. Selisih rerata antara PS-InSAR sebelum dan sesudah koreksi GACOS adalah sebesar -0,108 cm dengan standar deviasi $\pm 0,113$ cm. Uji signifikansi dua variabel 95% menunjukkan koreksi troposfer GACOS mampu mempengaruhi hasil PS-InSAR.

Kata kunci : *GACOS, Penurunan Muka Tanah, PS-InSAR, Semarang, StaMPS*

ABSTRACT

The coastal area is a potential place to settle and utilize natural resources. Ease of access and have the potential to be managed make most of the densely populated settlements are in this area. The consequence of this activity can be seen in coastal areas such as the city of Semarang, which experienced a land subsidence caused by various natural and man-made factors. The observation method that is often used for this phenomenon is the observation of GNSS. The distance interval that is too far between stations causes some areas not to be included in the land subsidence observation GNSS receiver. One solution that can be used is a multi-temporal Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technology called Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR). PS-InSAR has a problem in the form of troposphere errors that cause acceleration or deceleration of signals on the SAR sensor when making an acquisition. The Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR (GACOS) correction used in the PS-InSAR method will be able to eliminate the tropospheric effect on each image so that errors can be minimized and optimize the work of the PS-InSAR method. Based on the results of the PS-InSAR before and after corrected, it showed that in Semarang City that experienced the largest land subsidence was Genuk District, Pedurungan District, East Semarang District and North Semarang District. The average difference between PS-InSAR before and after GACOS correction was -0.108 cm with a standard deviation of ± 0.113 cm. The significance of the two variables test 95% shows that GACOS tropospheric correction can influence the results of the PS-InSAR.

Keywords : *GACOS, Land Subsidence, PS-InSAR, Semarang, StaMPS*

1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Wilayah pesisir merupakan tempat yang potensial dalam bermukim dan memanfaatkan sumber daya alam. Kemudahan akses dan daerah yang berpotensi untuk dikelola sehingga sebagian besar permukiman padat penduduk berada di wilayah tersebut. Pemanfaatan wilayah pesisir sering tidak memandang konsep tata ruang yang telah dibuat sehingga menyebabkan penurunan kualitas lingkungan atau degradasi (Dahuri, 2001).

Salah satu akibat dari aktivitas dapat dilihat pada wilayah pesisir seperti Kota Semarang yang sering mengalami penurunan muka tanah yang disebabkan berbagai faktor alam dan buatan manusia. Salah satu pengamatan yang dilakukan adalah dengan menggunakan *Global Navigation Satellite System (GNSS) receiver* (Abidin *et al.*, 2013). Interval jarak yang terlalu jauh antar stasiun menyebabkan beberapa area tidak tercakup dalam pengamatan penurunan muka tanah dengan pengamatan GNSS receiver (Catalao *et al.*, 2019).

Salah satu solusi yang dapat digunakan adalah dengan memanfaatkan teknologi *Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)* secara multi-temporal yang disebut *Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR)* (Ferretti *et al.*, 1999). Salah satu metode PS-InSAR yang berkembang adalah metode *Stanford Method of Persistent Scatterers (StaMPS)* yang dapat mengidentifikasi dan mengekstraksi deformasi tidak hanya objek tetap tetapi juga objek yang tidak tetap berdasarkan tingkat kecerahan dari pantulan citra SAR (Hooper *et al.*, 2004). Pada aplikasinya, PS-InSAR memiliki permasalahan berupa kesalahan troposfer yang menyebabkan sinyal pada sensor SAR saat melakukan akuisisi yang terkandung pada tiap citra *Synthetic Aperture Radar (SAR)*.

Metode koreksi troposfer *Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR (GACOS)* yang digunakan pada metode PS-InSAR akan dapat mengeliminasi efek troposfer pada masing-masing citra sehingga kesalahan dapat diminimalkan dan mengoptimalkan hasil PS-InSAR agar dapat dimanfaatkan dalam pemantauan penurunan muka tanah. GACOS menggunakan model *Iterative Tropospheric Decomposition (ITD)* untuk memisahkan sinyal bertingkat dan turbulen dari *tropospheric delays* menghasilkan *zenith total delays* dengan resolusi tinggi yang akan digunakan untuk mengoreksi pengukuran InSAR. Keunggulan dari GACOS adalah tersedia secara global, bersifat

near real time dan mudah diintegrasikan dengan data InSAR (Yu *et al.*, 2018).

1.2. Rumusan Masalah

Metode PS-InSAR merupakan metode penginderaan jauh yang dapat mengidentifikasi geodinamika terutama dalam pemantauan penurunan muka tanah secara multi temporal. Kemampuan citra SAR yang mampu menembus awan dan digunakan berbagai kondisi tidak akan terlepas dari kesalahan troposfer. Permasalahan ini disebut dengan *tropospheric delay* pada masing-masing citra yang berdampak pada hasil PS-InSAR. Dampaknya berupa pelambatan sinyal saat akuisisi sehingga wilayah yang harusnya mengalami penurunan akan menjadi naik ataupun sebaliknya. Hal tersebut yang mendasari perlunya dilakukan koreksi troposfer agar dapat diketahui nilai kesalahannya dan dikoreksi sehingga nilai pergeseran hasil dari PS-InSAR menjadi akurat dan presisi.

4.1. Ruang Lingkup Penelitian

Ruang Lingkup Penelitian antara lain:

1. Citra SAR yang digunakan adalah citra Sentinel-1A sepanjang tahun 2015 sampai 2018
2. Metode pengamatan penurunan muka tanah menggunakan metode *Persistent Scatterers InSAR* yakni metode *Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS)*.
3. Proses estimasi dan koreksi kesalahan troposfer menggunakan metode *weather model correction* yakni *Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR (GACOS)*
4. Wilayah penelitian merupakan wilayah Kota Semarang.

2. TINJAUAN PUSTAKA

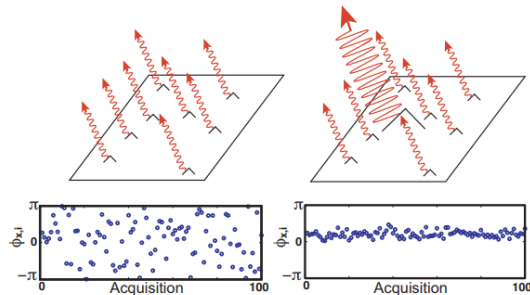
4.1. Penurunan Muka Tanah

Penurunan muka tanah adalah pergeseran vertikal ke bawah permukaan bumi karena kurangnya daya dukung tanah, beban yang berlebih atau kombinasi antar keduanya yang disebabkan alami maupun buatan manusia (Marker, 2013). Penyebab terjadinya penurunan muka tanah dapat terjadi baik secara lokal maupun regional, beberapa faktor antara lain akibat hilangnya daerah resapan air, struktur geologi dan semakin banyaknya aktivitas manusia untuk menggunakan air tanah

melebihi kapasitasnya (Reddish & Whittaker, 2012)

4.2. Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar

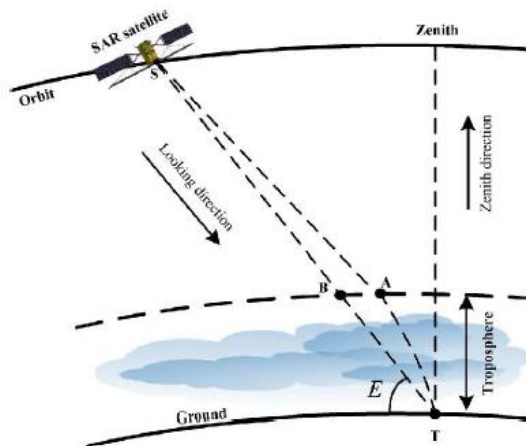
Persistent Scatterer merupakan pengembangan metode DInSAR yang secara multi temporal dapat mengeliminasi dekorelasi geometri untuk mengamati objek tetap di permukaan bumi (Ferretti *et al.*, 1999). Metode ini kemudian berkembang dengan pengamatan yang tidak hanya fokus pada objek tetap melainkan objek tidak tetap berdasarkan tingkat kecerahan dari pantulan citra SAR atau *Amplitude Dispersion* yang salah satunya adalah metode *Stanford Method for Persistent Scatterers* (Hooper *et al.*, 2004). Namun metode ini masih terpengaruh oleh adanya kesalahan troposfer pada citra yang dapat berakibat pada tidak optimalnya kerja InSAR.



Gambar 1. Konsep PS-InSAR (Hooper *et al.*, 2004)

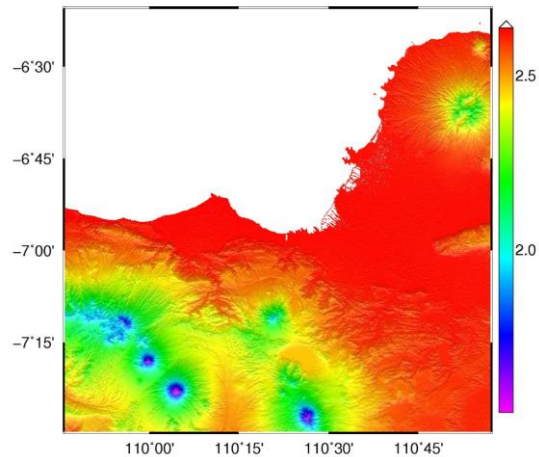
4.3. Efek dan Metode Koreksi Troposfer pada InSAR

Kesalahan troposfer merupakan efek yang disebabkan karena variasi tekanan, suhu dan kelembapan yang menyebabkan sinyal mengalami *tropospheric delays*.



Gambar 2. Efek Troposfer (Yu *et al.*, 2017)

Metode koreksi troposfer yang digunakan merupakan *phase-based correction*, metode *spectrometer* dan *weather model correction* (Bekaert *et al.*, 2015). *Weather model correction* merupakan koreksi troposfer dengan memanfaatkan model cuaca. Salah satu metode *weather model correction* adalah menggunakan *Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR* (GACOS) untuk melakukan koreksi komponen hidrostatik dan komponen basah pada troposfer.



Gambar 3. Zenith Tropospheric Delays Kota Semarang (Yu *et al.*, 2017)

GACOS menggunakan model *Iterative Tropospheric Decomposition* (ITD) untuk memisahkan sinyal dan komponen troposfer dengan secara *real time* (Yu *et al.*, 2017). Secara matematis, *tropospheric delay* dalam bentuk integrasi komponen hidrostatik dan basah atau N seperti GACOS dihitung dengan persamaan (1).

$$N = \left(k_1 \frac{P}{T}\right)_{hydr} + \left(k_2' \frac{P}{T} + k_3 \frac{P}{T^2}\right)_{wet} = N_{hydr} + N_{wet}$$

$$\Phi_{tropo} = \frac{-4\pi}{\lambda \cos \theta} \int_{h_1}^{h_{top}} (N_{hydr} + N_{wet}) dh \tag{1}$$

Dengan P merupakan tekanan troposfer, T merupakan temperatur, e merupakan uap air, θ merupakan *incidence angle*, λ merupakan panjang gelombang dan $-4\pi/\lambda$ merupakan faktor konversi *pseudo-range* ke *phase delays*. Nilai koefisien dari k_1 sebesar $77,6 \text{ K hPa}^{-1}$, k_2 sebesar $23,3 \text{ K hPa}^{-1}$ dan k_3 $3,75 \times 10^5 \text{ K}^2 \text{ hPa}^{-1}$ (Smith & Weintraub, 1953).

3. METODE PENELITIAN

4.1. Alat dan Bahan Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini antara lain:

- 1) Perangkat Lunak
 - a. Sistem Operasi Windows 10 64-bit
 - b. Sistem Operasi Linux Ubuntu 18.04
 - c. Perangkat Lunak SNAP 6.0
 - d. Perangkat Lunak Matlab 2016b
 - e. Perangkat Lunak ArcGIS 10.3.1
 - f. Microsoft Office 2016
- 2) Perangkat Keras
 - a. Laptop
 - b. *Harddisk* dan *Flashdisk*

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- 1) Citra Sentinel 1-A level-1 SLC Tipe *Interferometric Wide Swath (IW)* dengan resolusi range 5 m x azimuth 20 m Orbit Satelit Ascending tahun 2015 – 2018 wilayah Kota Semarang
- 2) Digital Elevation Model (DEM) Nasional resolusi 8,1 m wilayah Kota Semarang
- 3) Data *Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR* tahun 2015 – 2018.

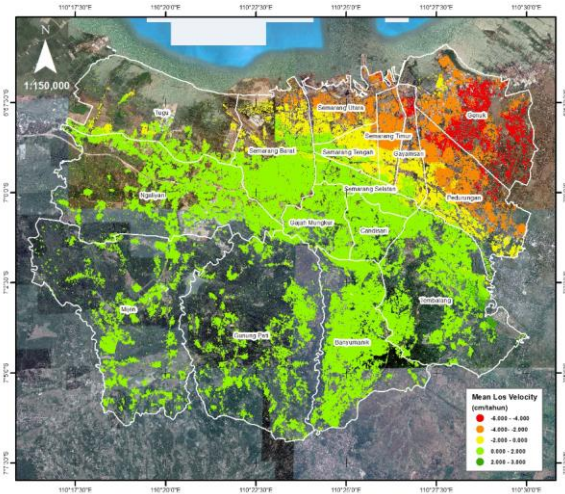
4.2. Metodologi

Metodologi pada penelitian ini dimulai dari proses persiapan yang terdiri dari studi literatur dan persiapan data dan peralatan yang dibutuhkan. Tahapan kedua adalah proses PS-InSAR yang meliputi proses pemilihan titik kandidat PS, koreksi *phase noise*, seleksi titik PS, proses *unwrapping*. Hasil dari proses ini berupa nilai pergeseran 1-D dalam bentuk *mean LOS velocity*. Selanjutnya dilakukan proses koreksi menggunakan GACOS yang terdiri dari perhitungan SAR *delays* pada masing-masing citra dan perhitungan *tropospheric delay* dalam bentuk fasa agar dapat diintegrasikan pada metode PS-InSAR sehingga didapatkan pergeseran 1-D terkoreksi dalam bentuk *mean LOS velocity* disajikan per kecamatan di Kota Semarang. Uji statistik berupa uji signifikansi dua variabel dengan tingkat kepercayaan 95 % akan dilakukan agar dapat diketahui berpengaruh atau tidak berpengaruhnya koreksi GACOS pada PS-InSAR

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Penurunan Muka Tanah Metode PS-InSAR

Berdasarkan hasil PS-InSAR, nilai *Line of Sight (LOS)* secara rerata berada pada rentang nilai -5,884 cm sampai 2,759 cm kemudian dibagi dalam 5 kelas seperti Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Hasil PS-InSAR

Secara wilayah administrasi kecamatan di Kota Semarang, hasil *line of sight (LOS)* dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Hasil PS-InSAR per kecamatan

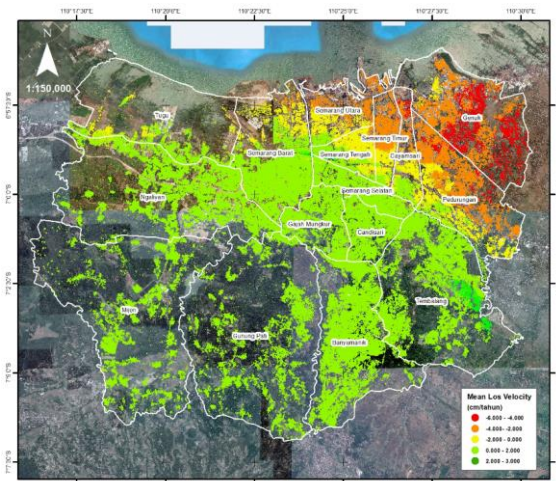
Kecamatan	Nilai LOS (cm/tahun)		
	Rerata	Maksimum	Minimum
Semarang Timur	-1,993	0,905	-4,43
Ngaliyan	0,357	1,232	-0,329
Gunung Pati	0,434	0,93	-0,201
Gajah Mungkur	0,451	0,856	-0,189
Tembalang	0,962	2,759	-0,415
Semarang Tengah	-0,351	2,179	-2,958
Gayamsari	-1,105	0,811	-4,703
Semarang Barat	0,208	2,273	-2,85
Banyumanik	0,613	1,205	-0,23
Candisari	0,511	0,979	0,096
Semarang Selatan	0,362	2,112	-0,536
Genuk	-3,917	-0,613	-5,884
Semarang Utara	-1,676	1,579	-4,433
Mijen	0,450	1,314	-0,073
Tugu	0,204	0,814	-1,085
Pedurungan	-2,210	0,809	-5,143

Berdasarkan hasil LOS PS-InSAR tahun 2015 – 2018 pada masing-masing kecamatan di Kota Semarang. Secara keseluruhan wilayah Kota Semarang mengalami penurunan. Penurunan terbesar terjadi pada Kecamatan Genuk dengan rerata -3,917 cm/tahun, Kecamatan Pedurungan dengan rerata -2,210 cm/tahun, Kecamatan Semarang Timur dengan rerata -1,993 cm/tahun dan Kecamatan Semarang Utara dengan rerata 1,676 cm/tahun.

4.2. Hasil Penurunan Muka Tanah Metode PS-InSAR Terkoreksi GACOS

Berdasarkan hasil koreksi menggunakan GACOS, interval nilai *Line of Sight (LOS)* dari PS-

InSAR mengalami pergeseran menjadi rentang mulai dari -5,727 cm sampai 2,839 cm yang kemudian dibagi kedalam 5 kelas seperti Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Hasil PS-InSAR Terkoreksi GACOS

Secara wilayah administrasi kecamatan di Kota Semarang, hasil *line of sight* (LOS) dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Hasil PS-InSAR terkoreksi GACOS per kecamatan

Kecamatan	Nilai LOS (cm/tahun)		
	Rerata	Maksimum	Minimum
Semarang Timur	-1,790	1,113	-4,237
Ngaliyan	0,385	1,266	-0,360
Gunung Pati	0,371	1,008	-0,201
Gajah Mungkur	0,610	1,014	-0,053
Tembalang	1,063	2,839	-0,293
Semarang Tengah	-0,146	2,384	-2,756
Gayamsari	-0,904	1,013	-4,521
Semarang Barat	0,379	2,471	-2,671
Banyumanik	0,589	1,248	-0,159
Candisari	0,668	1,099	0,272
Semarang Selatan	0,562	2,313	-0,333
Genuk	-3,749	-0,446	-5,727
Semarang Utara	-1,480	1,778	-4,255
Mijen	0,270	1,295	-0,200
Tugu	0,231	0,864	-0,956
Pedurungan	-2,028	0,943	-4,974

Berdasarkan hasil LOS PS-InSAR yang telah dikoreksi GACOS tahun 2015 – 2018 pada masing-masing kecamatan di Kota Semarang secara keseluruhan wilayah Kota Semarang mengalami penurunan. Berbeda dengan hasil PS-InSAR sebelum proses koreksi, penurunan terbesar terjadi pada Kecamatan Genuk dengan rerata -3,749 cm/tahun, Kecamatan Pedurungan dengan rerata -2,028 cm/tahun, Kecamatan Semarang Timur dengan rerata -1,790 cm/tahun dan Semarang Utara dengan rerata -1,480 cm/tahun.

4.3. Hasil Perbandingan PS-InSAR Sebelum dan Sesudah Koreksi Troposfer GACOS

Perbandingan hasil PS-InSAR sebelum dan sesudah koreksi GACOS dapat dilihat pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Perbandingan PS-InSAR sebelum dan sesudah koreksi GACOS

Kecamatan	Nilai LOS (cm/tahun)		
	Rerata PS-InSAR	Rerata PS-InSAR - GACOS	Selisih
Semarang Timur	-1,993	-1,790	-0,203
Ngaliyan	0,357	0,385	-0,028
Gunung Pati	0,434	0,371	0,063
Gajah Mungkur	0,451	0,610	-0,159
Tembalang	0,962	1,063	-0,101
Semarang Tengah	-0,351	-0,146	-0,206
Gayamsari	-1,105	-0,904	-0,200
Semarang Barat	0,208	0,379	-0,171
Banyumanik	0,613	0,589	0,024
Candisari	0,511	0,668	-0,158
Semarang Selatan	0,362	0,562	-0,200
Genuk	-3,917	-3,749	-0,168
Semarang Utara	-1,676	-1,480	-0,196
Mijen	0,450	0,270	0,180
Tugu	0,204	0,231	-0,027
Pedurungan	-2,210	-2,028	-0,181
Rerata			-0,021
Standar Deviasi			0,043

Hasil di atas menunjukkan bahwa selisih rerata antara PS-InSAR sebelum dan sesudah koreksi GACOS dilakukan adalah sebesar -0,108 cm dengan standar deviasi $\pm 0,113$ cm. Berdasarkan uji signifikansi dua variable dengan tingkat kepercayaan 95 % dengan hipotesis:

H₀ : menunjukkan koreksi GACOS memiliki tidak berpengaruh pada hasil PS-InSAR

H₁ : menunjukkan koreksi GACOS berpengaruh pada hasil PS-InSAR.

Data yang digunakan untuk uji adalah rerata dari hasil PS-InSAR sebelum dan sesudah koreksi GACOS serta nilai varian dari hasil PS-InSAR sebelum dan sesudah koreksi GACOS. Nilai tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Perhitungan nilai t-hitung

Nilai	PS-InSAR	PS-InSAR - GACOS
Rerata	-0,419	-0,311
Varian	1,870	1,735
Jumlah Sampel	16	16
Nilai t-hitung	-3,71024	

Berdasarkan hasil perhitungan nilai rerata, varian dan jumlah sampel didapatkan nilai t-hitung sebesar -3,71024. Nilai t-tabel *two-tail* untuk tingkat kepercayaan 95% adalah sebesar $\pm 2,13145$. Apabila t-hitung dikaitkan dengan t-tabel maka nilai t-hitung tidak berada pada rentang t-tabel sehingga hipotesis H_0 ditolak dan H_1 diterima. Hasil uji signifikansi dua variabel menunjukkan bahwa hasil koreksi GACOS mempengaruhi nilai PS-InSAR.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil PS-InSAR sebelum dan sesudah koreksi GACOS menunjukkan bahwa kecamatan yang mengalami penurunan muka tanah terbesar adalah Kecamatan Genuk, Kecamatan Pedurungan dan Kecamatan Semarang Timur. Berdasarkan uji statistik, koreksi GACOS mempengaruhi hasil PS-InSAR. Namun perlu dilakukan uji PS-InSAR sebelum dan sesudah terkoreksi GACOS dengan objek tetap atau titik pengamatan GNSS untuk mengetahui tingkat akurasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada civitas akademika Program Magister Teknik Geomatika Universitas Gadjah Mada, Andy Hooper dari University of Leeds, David Bekaert dari California Institute of Technology serta Laboratorium Pengukuran dan Pemetaan Dasar Teknik Geodesi Universitas Diponegoro yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian ini baik penyediaan data, algoritma pengolahan maupun sumber daya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H.Z., Andreas, H., Gumilar, I., Sidiq, T.P. & Fukuda, Y., 2013, Land subsidence in coastal city of Semarang (Indonesia): Characteristics, impacts and causes, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 4, 3, 226–240.
- Bekaert, D.P.S., Walters, R.J., Wright, T.J., Hooper, A.J. & Parker, D.J., 2015, Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques, *Remote Sensing of Environment*, 170, 40–47. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425715301231>
- Dahuri, R., 2001, Pengelolaan Ruang Wilayah Pesisir dan Lautan Seiring dengan Pelaksanaan Otonomi Daerah, *Mimbar: Jurnal Sosial dan Pembangunan*, 17, 2, 139–171.
- Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F., 1999, Permanent scatterers in SAR interferometry, In, *IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99 (Cat. No.99CH36293)*, pp. 1528–1530 vol.3.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. & Kampes, B., 2004, A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, *Geophysical research letters*, 31, 23.
- Marker, B.R., 2013, Land Subsidence, In, P. T. Bobrowsky, ed. *Encyclopedia of Natural Hazards*, Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 583–590., https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_208.
- Reddish, D.J. & Whittaker, B.N., 2012, *Subsidence: occurrence, prediction and control*, Elsevier.
- Smith, E.K. & Weintraub, S., 1953, The Constants in the Equation for Atmospheric Refractive Index at Radio Frequencies, *Proceedings of the IRE*, 41, 8, 1035–1037.
- Yu, Z., Li, Z. & Wang, S., 2015, An Imaging Compensation Algorithm for Correcting the Impact of Tropospheric Delay on Spaceborne High-Resolution SAR, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53, 9, 4825–4836.