

**STUDI PENURUNAN MUKA TANAH DENGAN METODE
SMALL BASELINE AREA SUBSET (SBAS) MENGGUNAKAN
CITRA SENTINEL-1A
(STUDI KASUS: KOTA SEMARANG)**

An Nisa Tri Rahmawati^{*)}, Yudo Prasetyo, Bandi Sasmito

Departemen Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudarto, S.H., Tembalang, Semarang Telp. (024)76480785, 76480788
Email : rahmawati.annisatri@gmail.com

ABSTRAK

Kota Semarang merupakan kota metropolitan terbesar kelima di Indonesia dan salah satu kota paling berkembang di Jawa Tengah. Pesatnya perkembangan yang dialami Kota Semarang tidaklah luput dari adanya bencana yang harus dihadapi. Bencana terbesar bagi Kota Semarang adalah penurunan muka tanah. Oleh sebab itu, penelitian ini mengkaji terkait penurunan muka tanah di Kota Semarang. Pengamatan penurunan muka tanah pada penelitian ini diamati dengan menggunakan teknik *Small Baseline Area Subset* (SBAS). Teknik SBAS merupakan teknik yang biasa digunakan untuk mengamati deformasi secara time series untuk mengamati daerah perkotaan. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah 13 citra Sentinel-1A SLC tahun 2015-2018. Pengolahan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak GMTSAR untuk mendapatkan nilai laju penurunan muka tanah. Hasil pengolahan SBAS mendapatkan nilai laju penurunan muka tanah di Kota Semarang dengan rentang $0 \pm 1,3$ hingga $9,4 \pm 1,3$ cm/tahun yang terjadi pada $128,65 \text{ km}^2$ (32,92%) dari luas wilayah Kota Semarang. Laju penurunan muka tanah rata-rata di Kota Semarang adalah $0,4 \pm 1,3$ cm/tahun. Kecamatan Genuk merupakan kecamatan yang memiliki nilai rata-rata laju penurunan muka tanah tertinggi, yaitu sebesar $5,8 \pm 1,3$ cm/tahun yang terjadi pada seluruh wilayah Genuk. Sementara itu, kecamatan yang memiliki nilai rata-rata laju penurunan muka tanah terendah adalah Kecamatan Candisari dengan laju $0,1 \pm 1,3$ cm/tahun yang terjadi pada $0,01 \text{ km}^2$ (0,22%) dari total luas wilayah Kecamatan Gunungpati.

Kata Kunci : GMTSAR, Penurunan Muka Tanah, SBAS, Sentinel-1A

ABSTRACT

Semarang City is Indonesia's fifth-largest metropolis and one of the most thriving cities in Central Java. The rapid development of the Semarang City has not escaped the disaster it has to deal with which leads to land subsidence that occurs to be the most problematic disaster in Semarang City. Therefore, this study examines the land subsidence of Semarang City. The land subsidence observation in this study is observed using Small Baseline Area Subset (SBAS) technique. SBAS technique that is commonly used to observe time series deformation in urban areas. The data used in this study is a stack of Sentinel-1A SLC imagery data consisted of 13 images from 2015-2018. The process is done by using GMTSAR software to get the land subsidence rate. The result of SBAS technique is the land subsidence rate in Semarang with range 0 ± 1.3 through 9.4 ± 1.3 per year that happens in 128.65 km^2 or 32.92% of Semarang City area. The land subsidence rate for Semarang city is $0.4 \pm 1,3$ per year. Genuk district has the highest land subsidence rate, that is 5.8 ± 1.3 cm per year happens in all of Genuk district area. Meanwhile, district which has the lowest land subsidence rate is Candisari district with 0.1 ± 1.3 cm per year rate happens in 0.01 km^2 or 0.22% of Gunungpati district area.

Keywords: GMTSAR, Land Subsidence, SBAS, Sentinel-1A

^{*)} Penulis Utama, Penanggung Jawab

I. Pendahuluan

I.1 Latar Belakang

Kota Semarang adalah Ibukota Provinsi Jawa Tengah yang merupakan kota metropolitan terbesar kelima di Indonesia setelah Jakarta, Surabaya, Medan dan Bandung dengan luas wilayah sebesar 373,70 km². Sebagai salah satu kota yang paling berkembang di Jawa Tengah, Kota Semarang memiliki penduduk sebanyak 1.815.729 jiwa. Kepadatan penduduk di kota ini mencapai 4.859 jiwa/km². Namun, pesatnya perkembangan di Kota Semarang tidak luput dari berbagai bencana. Bencana terbesar yang dihadapi oleh Kota Semarang adalah Penurunan Muka Tanah (PMT).

Berbagai macam faktor menjadi penyebab terjadinya Penurunan Muka Tanah (PMT). Faktor utama penyebab Penurunan Muka Tanah (PMT) diantaranya pengambilan air tanah yang berlebihan, penurunan karena beban bangunan, konsolidasi alamiah lapisan tanah, gaya-gaya tektonik, ekstraksi gas dan minyak bumi, penambangan bawah tanah, ekstraksi lumpur, patahan kerak bumi dan kontraksi panas bumi di lapisan litosfer (Prasetyo, 2014).

Pengamatan Penurunan Muka Tanah (PMT) dapat dilakukan dengan berbagai macam teknik, salah satunya dengan teknik *Small Baseline Area Subset* (SBAS). Teknik *Small Baseline Area Subset* (SBAS) telah digunakan untuk pengamatan penurunan muka tanah jangka panjang di Beijing (Hu dkk, 2014).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai dan Penurunan Muka Tanah (PMT) rata-rata di Kota Semarang. Nilai dan laju penurunan muka tanah diperoleh dengan menggunakan metode *Small Baseline Area Subset* (SBAS) yang menggunakan citra Sentinel-1A pada rentang waktu 2015-2018. Peta administrasi Kota Semarang akan ditambahkan dan kemudian digunakan untuk mengetahui Penurunan Muka Tanah (PMT) di tiap kecamatan di Kota Semarang.

I.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Bagaimana hasil analisis Penurunan Muka Tanah (PMT) Kota Semarang berdasarkan pengolahan citra Sentinel-1A dengan metode *Small Baseline Area Subset* (SBAS) tahun 2015-2018 yang dilakukan secara simultan (iterasi)?
2. Bagaimana analisis hasil verifikasi Penurunan Muka Tanah (PMT) terhadap data sekunder hasil penelitian Azeriansyah (2019) yang menggunakan metode PS-InSAR di Kota Semarang?

I.3 Tujuan dan Manfaat

Adapun tujuan dari penelitian ini meliputi:

1. Memperoleh nilai Penurunan Muka Tanah (PMT) di Kota Semarang tahun 2015-2018 hasil pengolahan dengan metode SBAS yang dilakukan secara simultan (iterasi).

2. Mengetahui analisis hasil verifikasi Penurunan Muka Tanah (PMT) terhadap data sekunder hasil penelitian Azeriansyah (2019) yang menggunakan metode PS-InSAR di Kota Semarang.

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan kontribusi di bidang keilmuan Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografis, khususnya mengenai teknik *Small Baseline Area Subset* (SBAS).
2. Hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai referensi pengambilan kebijakan terkait dampak yang ditimbulkan dari Penurunan Muka Tanah (PMT) di Kota Semarang.

I.4 Pembatasan Masalah

Adapun pembatasan masalah dalam penelitian ini meliputi:

1. Metode yang digunakan untuk mengetahui besar nilai Penurunan Muka Tanah (PMT) rata-rata per tahun di Kota Semarang pada citra Sentinel 1-A dengan menggunakan teknik *Small Baseline Area Subset* (SBAS) dalam rentang tahun 2015-2018.
2. Keluaran dari penelitian tugas akhir ini adalah Peta Penurunan Muka Tanah (PMT) Rata-Rata di Kota Semarang hasil pengolahan metode SBAS tahun 2015-2018 skala 1:150.000.

I.5 Ruang Lingkup Penelitian

I.5.1 Wilayah Penelitian

Wilayah penelitian secara umum berlokasi di Kota Semarang, Jawa Tengah. Kota Semarang terletak diantara 6°50' - 7°10' LS dan 109°35' - 110°50' BT.

I.5.2 Data dan Alat Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

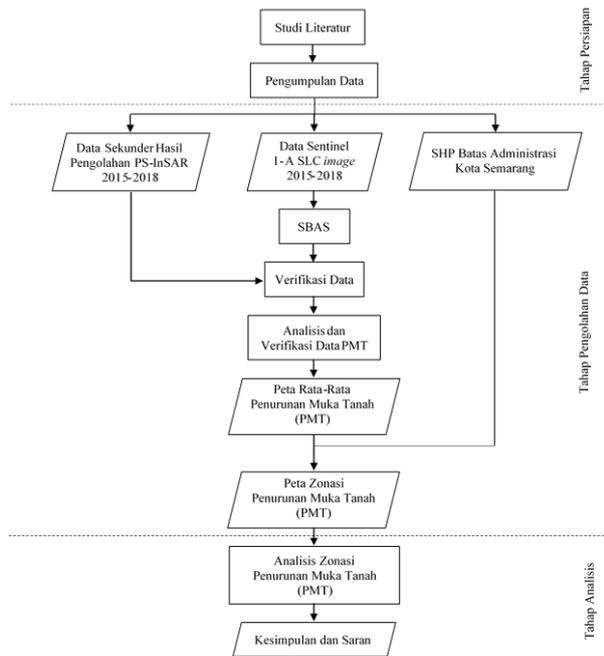
1. Citra Sentinel 1-A SLC tahun 2015-2018.
2. Data sekunder hasil pengolahan tinggi metode GPS tahun 2013-2018.
3. SHP Batas Administrasi Kota Semarang.

Alat yang digunakan pada penelitian ini dibagi menjadi dua jenis, yaitu perangkat keras dan perangkat lunak sebagai berikut

1. Perangkat keras
 - 1) Merek laptop: HP Pavilion 14-ab033TX
 - 2) Sistem Operasi: Windows 10 Pro 64-bit dan LINUX Ubuntu 19.04
 - 3) Processor: Intel® Core™ i7-5500U CPU @ 2.40 Ghz
 - 4) RAM: 12 GB
2. Perangkat lunak
 - 1) Perangkat lunak GMTSAR 5.7
 - 2) Perangkat lunak ArcMap 10.4
 - 3) Perangkat lunak QGIS 3.8.2-Zanzibar

I.6 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian ini secara garis besar dijabarkan pada diagram alir penelitian yang tertera pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

II. Tinjauan Pustaka

II.1 Kondisi Umum Wilayah Penelitian

Kota Semarang memiliki posisi astronomi di antara 6°50' - 7°10' Lintang Selatan dan 109°35' - 110°50' Bujur Timur. Kota Semarang berbatasan langsung dengan Laut Jawa di sebelah utara, Kabupaten Semarang di sebelah selatan, Kabupaten Kendal di sebelah barat dan Kabupaten Demak di sebelah Timur.

Struktur geologi yang terdapat di daerah Semarang umumnya berupa sesar yang terdiri dari sesar normal, sesar geser dan sesar naik. Sesar normal relatif berarah barat-timur sebagian agak cembung ke arah utara, sesar geser berarah utara selatan hingga barat laut-tenggara, sedangkan sesar normal relatif berarah barat-timur. Sesar-sesar tersebut umumnya terjadi pada batuan Formasi Kerek, Formasi Kalibening dan Formasi Damar yang berumur kuartar dan tersier (Sucipto dan Sutarto, 2007).

II.2 Penurunan Muka Tanah

Penurunan biasanya dikaitkan dengan penurunan suatu titik di permukaan ke tingkat yang lebih rendah. Penurunan Muka Tanah (PMT) diartikan sebagai pergeseran suatu titik secara vertikal tetapi dapat juga diartikan pengukuran dari pergeseran suatu titik secara horizontal (Whittaker dan Reddish, 1989).

Penurunan tanah dapat terjadi baik secara lokal maupun regional. Kondisi tersebut dikarenakan oleh beberapa faktor penyebab (Whittaker dan Reddish, 1989) sebagai berikut:

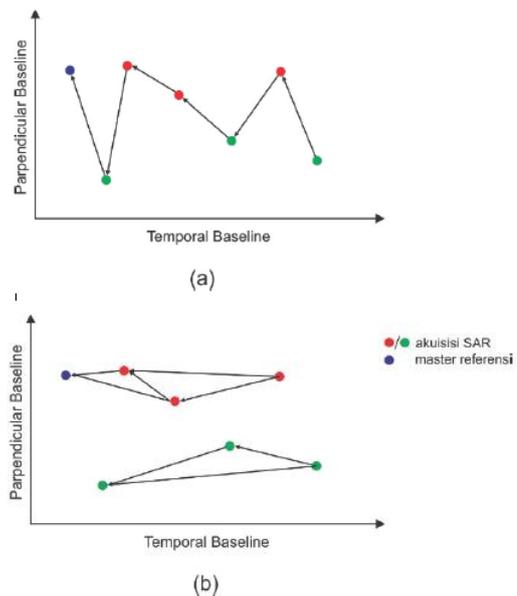
1. Penurunan muka tanah alami (*natural subsidence*)
2. Penurunan muka tanah akibat pengambilan air tanah dan penambangan mineral dalam bumi
3. Penurunan muka tanah akibat beban bangunan (*settlement*)

4. Penurunan muka tanah akibat pengambilan bahan padat dari tanah (aktifitas penambangan)

Besaran penurunan muka tanah ditentukan berdasarkan hasil hitungan dan analisis besaran laju penurunan tanah yang bernilai signifikan. Ditinjau dari sudut pandang geodesi, posisi turunnya permukaan tanah ditunjukkan melalui perubahan posisi vertikal muka tanah terhitung dari bidang referensi yang telah ditetapkan sebelumnya (Prasetyo dan Subiyanto, 2014).

II.3 Small Baseline Area Subset (SBAS)

Teknik *Small Baseline Area Subset* (SBAS) merupakan hasil pengembangan dari teknik DInSAR. Karakter khas dari algoritma DInSAR yang dikenal dalam literatur adalah pemilihan pasangan data interferometrik. Setiap akuisisi data SAR diwakili oleh suatu titik sementara setiap interferogram sesuai dengan busur yang menghubungkan dua titik contohnya pada dua citra SAR. Semakin besar nilai *baseline* tegak lurus dan/atau temporal, semakin signifikan dekorelasinya dengan interferogram. Oleh karena itu, tergantung pada pilihan distribusi interferometrik, asumsi fasa yang berbeda akan dilakukan (Casu, 2006).



Gambar 2. Distribusi akuisisi data SAR: (a) consecutive (b) small baseline subset (Setyadi, 2016)

Pendistribusian akuisisi SAR yang paling mudah adalah dengan cara berurutan (*consecutive*). Kekurangan dari distribusi ini adalah dihasilkannya *baseline* yang besar seperti yang tampak pada Gambar 2.a. Oleh karena itu, pemilihan distribusi pasangan data SAR yang optimal dapat dilakukan dengan membatasi *baseline* dengan nilai tertentu sehingga diperoleh distribusi seperti Gambar 2.b.

II.4 PS-InSAR

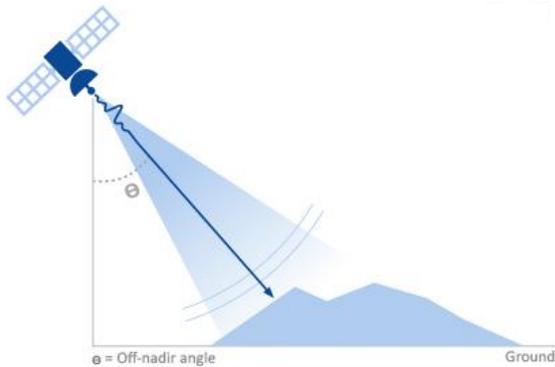
PS-InSAR dan SBAS dikembangkan untuk mengeliminasi kesalahan dekorelasi yang terjadi dikarenakan waktu pengamatan dengan rentang waktu

yang lama. Proses dalam metode PS-InSAR menggunakan perhitungan perataan matematika, estimasi kesalahan serta terdapat proses pemilahan pada data (Azeriansyah, 2019).

Prinsip utama dari teknik PS-InSAR memanfaatkan data pengamatan citra SAR multitemporal dalam rentang waktu pajang untuk mendeteksi titik-titik potensial koherensi. Titik-titik PS (*Permanent Scatterer*) pada umumnya berupa obyek-obyek *solid* di permukaan bumi yang menjadi pemantul alami yang relatif koheren terhadap dimensi waktu. Sebaran titik-titik PS dan perbedaan nilai fasa untuk setiap individu titik yang dianalisis lebih lanjut menggunakan metode PS-InSAR. Sehingga secara teknis nilai pergeseran dari titik-titik PS dapat diestimasi melalui korelasi beda fasenya terhadap waktu (Prasetyo, 2014).

II.5 Koreksi Atmosferik

Menurut Ismullah (2002), penjalaran gelombang elektromagnetik dapat mengalami penundaan yang disebabkan oleh adanya pengaruh atmosfer. Pengaruh atmosfer terhadap penjalaran gelombang mengakibatkan terjadinya perubahan indeks refraksi akibat gas-gas atmosfer serta pengaruh cairan dan partikel-partikel kecil sehingga terjadi penundaan sinyal, pembelokan arah sinar, penyerapan, pemantulan serta penghamburan. Ilustrasi pengaruh atmosfer terhadap penjalaran gelombang dapat dilihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Pengaruh atmosfer terhadap penjalaran gelombang (Tymofyeyeva, 2017)

II.6 Koreksi Enhanced Spectral Diversity (ESD)

Koreksi *Enhanced Spectral Diversity* (ESD) merupakan koreksi yang digunakan untuk mengurangi lompatan fasa hasil interferogram pada daerah *burst* yang bertampalan. Nilai interferogram pada pertampalan *burst* biasanya akan menyebabkan diskontinuitas pada nilai interferogram. Hasil dari penggunaan koreksi ini adalah pergeseran azimuth yang dihasilkan menjadi lebih halus (Xu dan Sandwell, 2017). Algoritma yang digunakan pada koreksi ini adalah sebagai berikut

$$\Delta\alpha = PRF \frac{\phi}{2\pi(f_u - f_l)}$$

Koreksi *Enhanced Spectral Diversity* (ESD) tidak selalu diperlukan dalam pengolahan citra Sentinel. Koreksi ini hanya diperlukan apabila wilayah yang diamati berada pada daerah pertampalan *burst*.

II.7 Citra Sentinel

Sentinel-1 merupakan satelit radar milik European Space Agency (ESA) yang dikembangkan oleh Copernicus. Satelit radar ini menggunakan *Synthetic Aperture Radar* (SAR) yang merupakan sensor aktif sehingga dapat melakukan penyiaran siang dan malam, mampu menembus awan dan tidak dipengaruhi oleh kondisi cuaca. Produk dari Sentinel-1 merupakan citra *open source* yang dapat diunduh secara gratis pada web <https://scihub.copernicus.eu>. Gambaran satelit Sentinel-1 dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Satelit Sentinel-1 (ESA Sentinel Online, 2019)

II.8 GMTSAR

GMTSAR merupakan perangkat lunak *open source* yang digunakan untuk mengolah data SAR berupa diferensial SAR dan ScanSAR. Perangkat lunak ini mulai digunakan untuk publik sejak tahun 2010. Perangkat lunak ini dapat dijalankan dalam platform apa saja yang telah terpasang perangkat lunak GMT dan NetCDF. Pembuat perangkat lunak ini adalah David Sandwell, Rob Mellors, Xiaopeng Tong, Meng Wei, dan Paul Wessel. Semula bahasa pemrograman yang digunakan adalah Fortran kemudian diubah menjadi bahasa C agar dapat dijalankan di berbagai platform.

GMT digunakan untuk menampilkan semua produk sebagai file *postscript* dan gambar *kml* untuk Google Earth. Seperangkat skrip C-shell telah dikembangkan untuk pemrosesan gambar perataan untuk susun dan deret waktu (Sandwell dkk, 2016).

II.9 Uji Normalitas Kolmogorov-Smirnov (K-S)

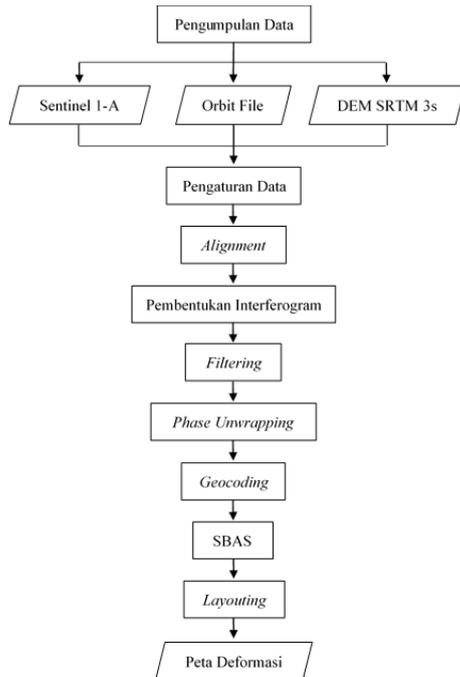
Konsep dasar dari Uji K-S adalah dengan membandingkan distribusi data yang akan diuji normalitasnya dengan distribusi normal baku. Distribusi normal baku adalah data yang telah ditransformasikan ke dalam bentuk *Z-Score* dan diasumsikan normal (Hidayat, 2012).

Seperti pada uji beda biasa, jika signifikansi yang diperoleh di bawah 0,05 berarti terdapat perbedaan yang signifikan sehingga data yang diuji dinyatakan tidak normal. Sebaliknya, jika signifikansi yang diperoleh di atas 0,05 maka tidak terdapat perbedaan yang signifikan sehingga data yang diuji dinyatakan normal.

III. Metodologi Pelaksanaan

III.1 Pengolahan SBAS

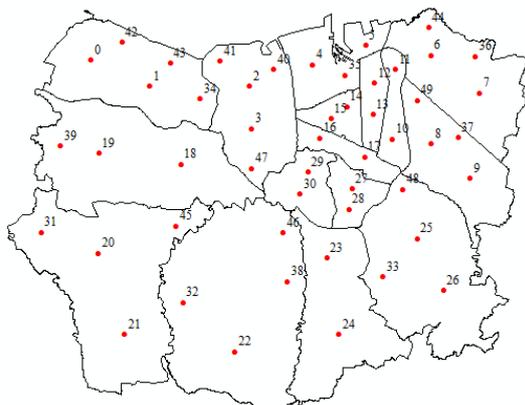
Pengolahan SBAS dikelompokkan menjadi tiga tahapan, yaitu tahap *pre-processing*, tahap *processing* dan tahap *post-processing*. Tahap *pre-processing* merupakan tahap pengaturan data dan *alignment*. Tahap *processing* meliputi tahap pembentukan interferogram, *filtering*, *phase unwrapping* dan *geocoding*. Tahap *post-processing* adalah tahap analisis *time series* dengan menggunakan metode SBAS. Pengolahan SBAS pada penelitian ini digambarkan pada diagram alir dalam Gambar 5.



Gambar 5. Diagram alir pengolahan SBAS

Pengolahan SBAS pada penelitian ini dilakukan dengan enam koreksi, yaitu tanpa koreksi, koreksi atmosfer lima kali iterasi, koreksi atmosfer sepuluh kali iterasi, koreksi ESD, koreksi ESD dan atmosfer lima kali iterasi serta koreksi ESD dan atmosfer sepuluh kali iterasi. Jumlah iterasi dalam koreksi atmosfer dipilih untuk mengetahui signifikansi hasil yang diperoleh.

III.2 Verifikasi Data



Gambar 6. Lokasi titik

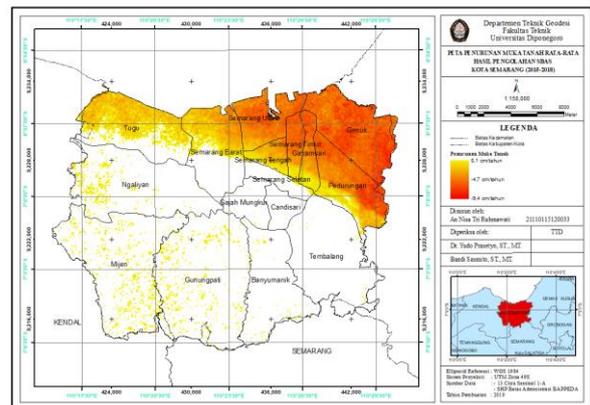
Data hasil pengolahan SBAS diverifikasi dengan menggunakan data sekunder penurunan muka tanah rata-rata dengan metode PS-InSAR dari penelitian Wirawan (2019). Penelitian tersebut menggunakan perangkat lunak SNAP dengan 22 citra Sentinel 1 yang diakuisisi pada tahun 2015-2018. Penelitian ini mengambil 50 titik yang dipilih secara acak untuk verifikasi data. Persebaran titik verifikasi dapat dilihat pada Gambar 6.

III.3 Uji Kolmogorov-Smirnov

Uji Kolmogorov-Smirnov (K-S) pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui signifikansi data penurunan muka tanah hasil pengolahan SBAS terhadap data penurunan muka tanah hasil pengolahan PS-InSAR yang digunakan untuk verifikasi. Data hasil pengolahan PS-InSAR dijadikan sebagai data normal baku dan data hasil pengolahan SBAS dijadikan sebagai data yang diuji. Uji K-S dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak IBM SPSS Statistics 24.

IV. Hasil dan Pembahasan

IV.1 Penurunan Muka Tanah Rata-Rata Tanpa Koreksi



Gambar 7. Penurunan Muka Tanah Rata-Rata Tanpa Koreksi

Tabel 1. Penurunan Muka Tanah Tanpa Koreksi di Kota Semarang

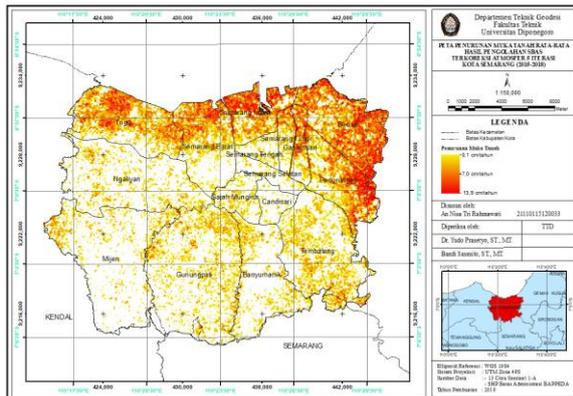
Kecamatan	Penurunan Muka Tanah (cm/tahun)			Luas Area Terdampak (%)
	Minimal	Maksimal	Rata-rata	
Banyumanik	0,1	0,4	0,2	1,72
Candisari	0,1	0,2	0,1	0,22
Gajah Mungkur	0,1	0,6	0,2	0,68
Gayamsari	0,1	8,1	3,6	99,87
Genuk	2,3	9,4	5,8	100
Gunungpati	0,1	1,6	0,3	7,96
Mijen	0,1	1,8	0,3	10,53
Ngaliyan	0,1	2,1	0,3	7,73
Pedurungan	0,1	8,8	4,3	94,83
Semarang Barat	0,1	5,6	2,1	52,54
Semarang Selatan	0,1	1,2	0,4	9,98
Semarang Tengah	0,1	6,2	2,3	9,19
Semarang Timur	0,1	7,4	4,5	99,60
Semarang Utara	0,8	7,4	4,6	100
Tembalang	0,1	1,0	0,2	0,50
Tugu	0,1	4,4	1,5	65,82

Hasil pengolahan ini menunjukkan nilai penurunan muka tanah di Kota Semarang berkisar dari $0,1 \pm 1,3$ cm/tahun hingga $9,4 \pm 1,3$ cm/tahun. Penurunan ini terjadi pada 128,65 km² (32,92%) dari

total luas wilayah Kota Semarang yang dapat dilihat pada **Gambar 7**. Rata-rata penurunan muka tanah yang terjadi adalah $0,4 \pm 1,3$ cm/tahun.

IV.2 Penurunan Muka Tanah Rata-Rata Terkoreksi Atmosfer Lima Iterasi

Hasil pengolahan ini menunjukkan nilai penurunan muka tanah di Kota Semarang berkisar dari $0,1 \pm 2,6$ cm/tahun hingga $13,9 \pm 2,6$ cm/tahun. Penurunan ini terjadi pada $95,83 \text{ km}^2$ (24,52%) dari total luas wilayah Kota Semarang yang dapat dilihat pada **Gambar 8**. Rata-rata penurunan muka tanah yang terjadi adalah $2,4 \pm 2,6$ cm/tahun.



Gambar 8. Penurunan Muka Tanah Rata-Rata Terkoreksi Atmosfer Lima Iterasi

Berdasarkan **Tabel 2**, penurunan muka tanah terjadi paling banyak di Kecamatan Genuk dengan presentase 86,88% dari luas wilayah kecamatan tersebut. Nilai penurunan tertinggi adalah $13,9 \pm 2,6$ cm/tahun yang terjadi di Kecamatan Semarang Utara dengan rata-rata penurunan tertinggi $4,6 \pm 2,6$ cm/tahun. Sementara penurunan muka tanah yang terjadi paling sedikit di Kecamatan Tembalang dengan presentase 0,22% dengan rata-rata $1,5 \pm 2,6$ cm/tahun.

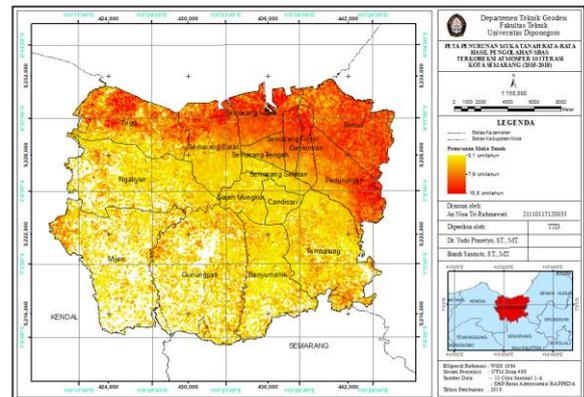
Tabel 2. Penurunan Muka Tanah Terkoreksi Atmosfer Lima Iterasi di Kota Semarang

Kecamatan	Penurunan Muka Tanah (cm/tahun)			Luas Area Terdampak (%)
	Minimal	Maksimal	Rata-rata	
Banyumanik	0,1	6,2	1,2	16,18
Candisari	0,1	4,0	0,6	9,66
Gajah Mungkur	0,1	4,6	1,0	20,28
Gayamsari	0,1	9,4	3,2	38,89
Genuk	0,1	12,8	4,3	86,88
Gunungpati	0,1	8,4	1,3	34,52
Mijen	0,1	7,1	1,3	19,01
Ngaliyan	0,1	7,1	1,2	25,40
Pedurungan	0,1	13,8	3,5	76,70
Semarang Barat	0,1	11,4	2,7	57,45
Semarang Selatan	0,1	4,1	3,4	21,81
Semarang Tengah	0,1	3,8	0,8	35,12
Semarang Timur	0,1	9,5	2,5	0,22
Semarang Utara	0,1	13,9	4,0	81,96
Tembalang	0,1	8,8	1,5	0,22
Tugu	0,1	13,1	3,0	69,88

IV.3 Penurunan Muka Tanah Rata-Rata Terkoreksi Atmosfer Sepuluh Iterasi

Hasil pengolahan ini menunjukkan nilai penurunan muka tanah di Kota Semarang berkisar dari $0,1 \pm 2,8$ cm/tahun hingga $15,8 \pm 2,8$ cm/tahun. Penurunan ini terjadi pada $326,86 \text{ km}^2$ (83,63%) dari

total luas wilayah Kota Semarang yang dapat dilihat pada **Gambar 9**. Rata-rata penurunan muka tanah yang terjadi adalah $3,1 \pm 2,8$ cm/tahun.



Gambar 9. Penurunan Muka Tanah Rata-Rata Terkoreksi Atmosfer Sepuluh Iterasi

Berdasarkan **Tabel 3**, penurunan muka tanah terjadi paling banyak di Kecamatan Semarang Tengah dan Semarang Timur dengan presentase 100% dari luas wilayah kedua kecamatan tersebut. Nilai penurunan tertinggi adalah $15,8 \pm 2,8$ cm/tahun yang terjadi di Kecamatan Tugu dengan rata-rata $4,2 \pm 2,8$ cm/tahun. Sementara penurunan muka tanah yang terjadi paling sedikit di Kecamatan Mijen dengan presentase 57,67% dengan rata-rata $1,6 \pm 2,8$ cm/tahun.

Tabel 3. Penurunan Muka Tanah Terkoreksi Atmosfer Sepuluh Iterasi di Kota Semarang

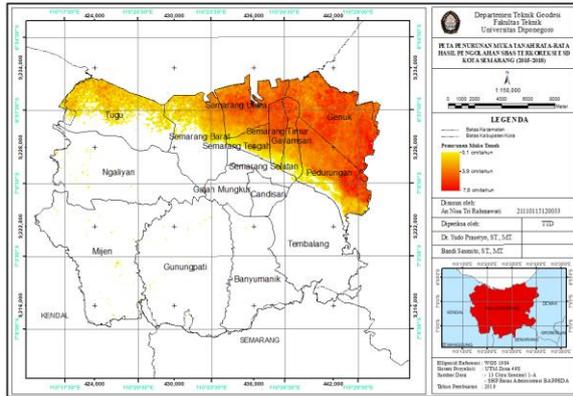
Kecamatan	Penurunan Muka Tanah (cm/tahun)			Luas Area Terdampak (%)
	Minimal	Maksimal	Rata-rata	
Banyumanik	0,1	7,5	1,4	82,37
Candisari	0,1	4,9	1,1	96,59
Gajah Mungkur	0,1	5,7	1,4	96,25
Gayamsari	0,1	11,2	1,3	99,88
Genuk	0,1	13,4	6,5	99,65
Gunungpati	0,1	9,7	0,7	67,29
Mijen	0,1	9,7	1,6	57,67
Ngaliyan	0,1	8,9	1,5	76,78
Pedurungan	0,1	14,4	5,9	99,77
Semarang Barat	0,1	13,7	3,9	98,40
Semarang Selatan	0,1	5,5	1,4	98,44
Semarang Tengah	0,2	7,2	4,0	100
Semarang Timur	0,1	11,8	6,4	100
Semarang Utara	0,1	15,0	6,8	99,99
Tembalang	0,1	10,1	1,9	89,49
Tugu	0,1	15,8	4,2	94,71

IV.4 Penurunan Muka Tanah Rata-Rata Terkoreksi ESD

Hasil pengolahan ini menunjukkan nilai penurunan muka tanah di Kota Semarang berkisar dari $0,1 \pm 1,5$ cm/tahun hingga $7,8 \pm 1,5$ cm/tahun. Penurunan ini terjadi pada $100,55 \text{ km}^2$ (27,00%) dari total luas wilayah Kota Semarang yang dapat dilihat pada **Gambar 10**. Rata-rata penurunan muka tanah yang terjadi adalah $3,3 \pm 1,5$ cm/tahun.

Berdasarkan **Tabel 4**, penurunan muka tanah terjadi paling banyak di Kecamatan Semarang Timur dengan presentase 97,36% dari luas wilayah kecamatan tersebut. Nilai penurunan tertinggi adalah $7,8 \pm 1,5$ cm/tahun yang terjadi di Kecamatan Genuk dengan rata-rata $4,8 \pm 1,5$ cm/tahun. Sementara

penurunan muka tanah yang terjadi paling sedikit di Kecamatan Banyumanik dan Candisari dengan presentase 0%.

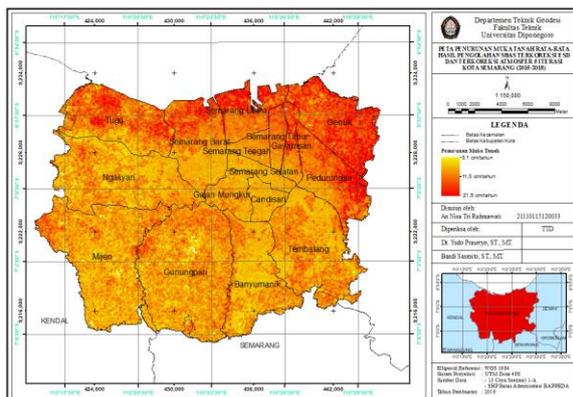


Gambar 10. Penurunan Muka Tanah Rata-Rata Terkoreksi ESD

Tabel 4. Penurunan Muka Tanah Terkoreksi ESD di Kota Semarang

Kecamatan	Penurunan Muka Tanah (cm/tahun)			Luas Area Terdampak (%)
	Minimal	Maksimal	Rata-rata	
Banyumanik	-	-	-	0
Candisari	0,1	4,0	0,7	17,17
Gajah Mungkur	-	-	-	0
Gayamsari	0,1	6,5	3,0	93,53
Genuk	1,1	7,8	4,8	100
Gunungpati	0,1	1,2	0,2	0,39
Mijen	0,1	1,1	0,2	0,64
Ngaliyan	0,1	1,1	0,3	0,63
Pedurungan	0,1	7,3	3,6	90,97
Semarang Barat	0,1	4,6	1,7	45,43
Semarang Selatan	0,1	0,8	0,3	4,05
Semarang Tengah	0,1	5,4	1,9	90,93
Semarang Timur	0,1	6,6	4,0	97,36
Semarang Utara	0,2	6,8	3,9	100
Tembalang	0,1	0,2	0,1	0,06
Tugu	0,1	4,6	1,2	51,89

IV.5 Penurunan Muka Tanah Rata-Rata Terkoreksi ESD dan Atmosfer Lima Iterasi



Gambar 11. Penurunan Muka Tanah Rata-Rata Terkoreksi ESD dan Atmosfer Lima Iterasi

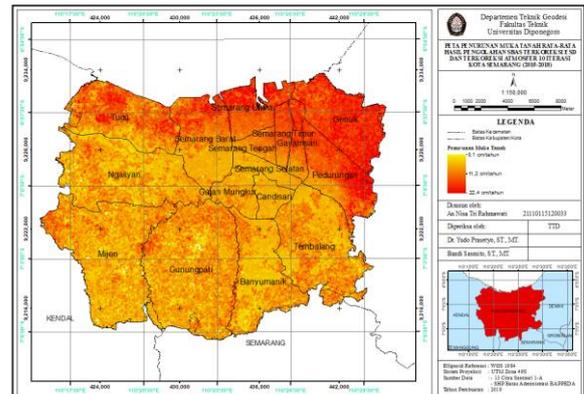
Hasil pengolahan ini menunjukkan nilai penurunan muka tanah di Kota Semarang berkisar dari $0,1 \pm 5,3$ cm/tahun hingga $21,9 \pm 5,3$ cm/tahun. Penurunan ini terjadi pada 389,97 km² (99,77%) dari total luas wilayah Kota Semarang yang dapat dilihat pada Gambar 11. Rata-rata penurunan muka tanah yang terjadi adalah $5,3 \pm 5,3$ cm/tahun.

Berdasarkan Tabel 5, penurunan muka tanah terjadi hampir di seluruh wilayah Kota Semarang. Nilai penurunan tertinggi adalah $21,9 \pm 5,3$ cm/tahun yang terjadi di Kecamatan Semarang Utara dengan rata-rata $9,4 \pm 5,3$ cm/tahun yang dapat dilihat pada Gambar IV.24. Sementara penurunan muka tanah yang terjadi paling sedikit di Kecamatan Mijen dengan presentase 9,49% dengan rata-rata $5,0 \pm 5,3$ cm/tahun.

Tabel 5. Penurunan Muka Tanah Terkoreksi ESD dan atmosfer lima iterasi di Kota Semarang

Kecamatan	Penurunan Muka Tanah (cm/tahun)			Luas Area Terdampak (%)
	Minimal	Maksimal	Rata-rata	
Banyumanik	0,1	13,9	4,8	99,88
Candisari	0,1	10,4	4,3	100
Gajah Mungkur	0,6	11,1	5,0	100
Gayamsari	0,7	16,0	8,0	100
Genuk	0,1	18,7	10,5	100
Gunungpati	0,1	15,2	5,4	100
Mijen	0,1	14,3	5,0	99,49
Ngaliyan	0,1	17,2	4,8	99,70
Pedurungan	0,3	19,2	8,7	99,80
Semarang Barat	0,7	18,7	6,8	99,92
Semarang Selatan	0,3	10,2	4,3	100
Semarang Tengah	0,6	9,4	5,7	99,86
Semarang Timur	2,7	16,3	7,8	100
Semarang Utara	0,1	21,9	9,4	100
Tembalang	0,1	14,8	5,5	99,98
Tugu	0,1	18,1	7,5	99,80

IV.6 Penurunan Muka Tanah Rata-Rata Terkoreksi ESD dan Atmosfer Sepuluh Iterasi



Gambar 12. Penurunan Muka Tanah Rata-Rata Terkoreksi ESD dan Atmosfer Sepuluh Iterasi

Tabel 6. Penurunan Muka Tanah Terkoreksi ESD dan atmosfer sepuluh iterasi di Kota Semarang

Kecamatan	Penurunan Muka Tanah (cm/tahun)			Luas Area Terdampak (%)
	Minimal	Maksimal	Rata-rata	
Banyumanik	0,1	13,9	4,7	99,85
Candisari	0,2	10,4	4,3	100
Gajah Mungkur	0,9	11,1	4,9	100
Gayamsari	2,0	16,4	9,0	100
Genuk	2,1	19,3	11,7	100
Gunungpati	0,1	15,1	5,4	99,65
Mijen	0,1	14,1	5	99,49
Ngaliyan	0,1	17,1	4,8	99,70
Pedurungan	1,4	20,0	10,0	100
Semarang Barat	0,1	18,9	7,1	99,85
Semarang Selatan	0,2	10,5	4,5	100
Semarang Tengah	0,1	10,1	6,9	99,86
Semarang Timur	3,3	16,8	9,3	100
Semarang Utara	3,6	22,4	10,5	100
Tembalang	0,1	14,8	5,4	99,99
Tugu	0,1	18,1	7,6	99,82

Hasil pengolahan ini menunjukkan nilai penurunan muka tanah di Kota Semarang berkisar dari $0,1 \pm 6,4$ cm/tahun hingga $22,4 \pm 6,4$ cm/tahun. Penurunan ini terjadi pada $389,95 \text{ km}^2$ (99,77%) dari total luas wilayah Kota Semarang yang dapat dilihat pada **Gambar 12**. Rata-rata penurunan muka tanah yang terjadi adalah $6,6 \pm 6,4$ cm/tahun.

Berdasarkan **Tabel 6**, penurunan muka tanah terjadi hampir di seluruh wilayah Kota Semarang. Nilai penurunan tertinggi adalah $22,4 \pm 6,4$ cm/tahun yang terjadi di Kecamatan Semarang Utara dengan rata-rata $10,5 \pm 6,4$ cm/tahun. Sementara penurunan muka tanah yang terjadi paling sedikit di Kecamatan Mijen dengan presentase 9,49 % dengan rata-rata $5,0 \pm 6,4$ cm/tahun.

IV.7 Hasil dan Analisis Verifikasi Data

Tabel 7. Hasil verifikasi data penurunan muka tanah

Nilai Titik	PS	Tanpa Koreksi	ATM 5	ATM 10	ESD	ESD DAN ATM 5	ESD DAN ATM 10
Rata-rata	-1,6	-1,4	-0,4	-3,3	-0,7	-6,5	-7,6
Terendah	-0,3	-7,0	-6,2	-8,5	-6,2	-14,7	-16,3
Tertinggi	0,5	2,0	7,2	5,0	2,5	0,0	-2,3
RMSE		1,3	2,6	2,8	1,5	5,3	6,4

Hasil verifikasi data pengolahan SBAS terhadap data sekunder penurunan muka tanah dengan metode PS-InSAR penelitian Azeriansyah (2019) diperoleh hasil seperti pada **Tabel 7**.

Nilai RMSE terkecil dari keenam metode tersebut adalah $\pm 1,3$ yang merupakan nilai RMSE dari metode SBAS tanpa koreksi. Oleh sebab itu, metode tersebut yang dipilih untuk digunakan sebagai dasar penarikan kesimpulan pada bab selanjutnya.

IV.8 Hasil dan Analisis Uji Kolmogorov-Smirnov

		Unstandardized Residual
N		50
Normal Parameters ^{a, b}	Mean	.0000000
	Std. Deviation	.51045192
Most Extreme Differences	Absolute	.089
	Positive	.089
	Negative	-.083
Test Statistic		.089
Asymp. Sig. (2-tailed)		.200 ^{c, d}
a. Test distribution is Normal. b. Calculated from data. c. Lilliefors Significance Correction. d. This is a lower bound of the true significance.		

Gambar 13. Hasil Uji Kolmogorov-Smirnov

Hasil dari Uji K-S dari penelitian ini memperoleh hasil seperti yang tampak pada **Gambar 13**. Signifikansi yang diperoleh dari uji ini lebih dari 0,05, yaitu sebesar 0,2. Hal ini menunjukkan bahwa data yang diuji, dalam penelitian ini berarti data hasil pengolahan SBAS, tidak signifikan dan dinyatakan baku. Kesimpulannya adalah data penurunan muka tanah hasil pengolahan SBAS memiliki perbedaan yang tidak signifikan terhadap

data penurunan muka tanah hasil pengolahan PS-InSAR.

V. Kesimpulan dan Saran

V.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan adalah:

1. Penurunan Muka Tanah atau PMT di Kota Semarang hasil pengolahan metode Small Baseline Area Subset (SBAS) menunjukkan bahwa Kota Semarang mengalami penurunan tanah maksimum sebesar $9,4 \pm 1,3$ cm/tahun dengan rata-rata $0,4 \pm 1,3$ cm/tahun dalam kurun waktu tahun 2015-2018. Penurunan tanah ini terjadi pada $128,65 \text{ km}^2$ (32,92%) dari total luas wilayah Kota Semarang.
2. Berdasarkan hasil verifikasi penurunan muka tanah rata-rata hasil pengolahan metode SBAS terhadap hasil metode PS-InSAR, diperoleh nilai RMSE terkecil sebesar $\pm 1,3$ dengan selisih nilai pada titik yang dijadikan acuan sebesar -2,2 hingga 3,0. Nilai RMSE tersebut diperoleh dari pengolahan SBAS tanpa koreksi. Hasil pengolahan SBAS tanpa koreksi menjadi hasil yang terbaik karena hasil metode PS-InSAR yang digunakan untuk verifikasi juga merupakan hasil pengolahan tanpa koreksi. Hasil Uji Kolmogorov-Smirnov menyatakan bahwa hasil pengolahan metode SBAS dan PS-InSAR tidak signifikan karena nilai signifikansinya lebih dari 0,05, yaitu sebesar 0,2.

V.2 Saran

Berikut adalah saran yang penulis berikan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan:

1. Sebaiknya mempelajari dan memahami optimalisasi perangkat lunak yang akan digunakan untuk pengolahan SBAS dengan baik.
2. Disarankan mencari perangkat lunak pembanding yang dapat digunakan untuk pengolahan SBAS selain GMTSAR.
3. Disarankan untuk menggunakan perangkat keras yang mampu untuk melakukan pengolahan dengan kapasitas data yang besar dan tingkat kerumitan pengolahan yang tinggi.
4. Sebaiknya memilih citra utama dengan *baseline* temporal yang optimal sehingga dapat menghasilkan nilai penurunan muka tanah rata-rata yang lebih baik.
5. Disarankan untuk mencari jurnal referensi yang menggunakan data dan perangkat lunak yang sama agar dapat dijadikan acuan dalam penentuan parameter pengolahan.
6. Disarankan melakukan pengkajian lebih lanjut terkait algoritma penapisan di luar *Enhanced Spectral Diversity* (ESD) dan koreksi atmosferik untuk memperoleh kualitas dan akurasi pengolahan yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardiansyah, F. 2012. *Analisis Akurasi Hasil Pengolahan Baseline GPS dengan Perangkat Lunak Komersial Untuk Studi Land Subsidence*. Skripsi Teknik Geodesi Universitas Diponegoro: Semarang.
- Azeriansyah, R. 2019. *Estimasi dan Koreksi Kesalahan Troposfer pada Pemantauan Penurunan Muka Tanah Kota Semarang Metode Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar*. Tesis Teknik Geodesi Universitas Gadjah Mada: Yogyakarta.
- Casu, F. 2006. *The Small Baseline Subset Technique: Performance Assessment and New Developments for Surface Deformation Analysis of Very Extended Areas*. University of Cagliari.
- ESA Sentinel Online. 2019. *Satellite Description*. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/satellite-description>. Diakses pada 9 Februari 2019.
- Hidayat, A. 2012. *Tutorial Uji Normalitas Kolmogorov Smirnov dengan SPSS*. <https://www.statistikian.com/2012/09/uji-normalitas-dengan-kolmogorov-smirnov-spss.html>. Diakses pada 21 November 2019.
- Hu, B., Han, S. W., Sun, Y. L., Hou, J. G., dan Liang, Jun. 2014. *Long-Term Land Subsidence Monitoring of Beijing (China) Using the Small Baseline Subset (SBAS) Technique*. MDPI, Basel, Switzerland.
- Ismullah, I. H. 2002. *Model Tinggi Permukaan Digital Hasil Pengolahan Radar Interferometri Satelit Untuk Wilayah Berawan (Studi Kasus Gunung Cikurai-Jawa Barat)*. Disertasi Institut Teknologi Bandung: Bandung.
- Prasetyo, Y. 2014. *Optimization of Analysis and Determination of Land Subsidence Estimated Using Light Permanent Scatterer Interferometric SAR (LPS-InSAR)*. Disertasi Institut Teknologi Bandung.
- Prasetyo, Y. dan Subiyanto, S. 2014. *Studi Penurunan Muka Tanah (Land Subsidence) Menggunakan Metode Permanent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (Ps-Insar) di Kawasan Kota Cimahi - Jawa Barat*. Jurnal Teknik Geodesi Universitas Diponegoro: Semarang.
- Sandwell, D. dkk. 2016. *GMTSAR: An InSAR Processing System Based on Generic Mapping Tools*. UC San Diego: Scripps Institution of Oceanography.
- Setyadi, B. 2016. *Analisis Penurunan Muka Tanah dengan Small Baseline Subset Differential SAR Interferograms di Kota Bandar Lampung*. Skripsi Universitas Lampung: Bandar Lampung.
- Sucipto dan Sutarto, A. 2007. *Analisis Kapasitas Tampungan Sistem Drainase Kali Beringin Untuk Pengendalian Banjir Wilayah Drainase Semarang Barat*. Jurnal Teknik Sipil Universitas Negeri Semarang: Semarang.
- Tymofeyeva, E. 2017. *GMTSAR Batch Processing. InSAR Processing and Theory with GMTSAR: Sentinel-1A Time Series UNAVCO*.
- Whitaker, B.N. dan Reddish. (1989). *Subsidence Occurrence, Prediction, and Control*. Elsevier Science Publishing Company INC, Belanda.
- Xu, X. dan Sandwell, D. 2017. *Sentinel-1 TOPS Processing in GMTSAR*. InSAR Processing and Theory with GMTSAR: Sentinel-1A Time Series UNAVCO.