

**KAJIAN PENURUNAN MUKA TANAH MENGGUNAKAN
DIFFERENTIAL INTERFEROMETRY SYNTHETIC APERTURE
RADAR (DInSAR) DAN UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV)
(STUDI KASUS: WILAYAH PEMBANGUNAN JALAN TOL
SEMARANG-DEMAK STA 17-22)**

Marissa Isabella Panggabean^{*)}, Fauzi Janu Amarrohman, Yudo Prasetyo

Departemen Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudarto, SH, Tembalang, Semarang Telp.(024)76480785, 76480788
Email: marissaisabella@students.undip.ac.id

ABSTRAK

Kecamatan Karangtengah merupakan salah satu kecamatan yang rentan terhadap peristiwa Penurunan Muka Tanah (PMT) akibat dari endapan aluvial muda yang mendominasi di Desa Batu, Kedunguter, Dukun, Karang Sari, Grogol dan Pulosari. Terkait peristiwa penurunan muka tanah, di lokasi ini juga sedang dilakukan pembangunan jalan tol Semarang-Demak yang berada pada STA 17-22. Penelitian ini menggunakan metode DInSAR (*Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar*) dalam mendapatkan nilai penurunan muka tanah dan penggunaan UAV untuk mendapatkan informasi perubahan volumetrik dengan menggunakan data *Digital Elevation Model* (DEM) yang terjadi selama rentang waktu penelitian pada wilayah pembangunan jalan tol. Hasil dari pengolahan DInSAR pada bulan Agustus hingga Oktober menunjukkan bahwa penurunan muka tanah tertinggi terjadi pada STA 20 sebesar $7,1 \pm 2,4$ cm/tahun memiliki luas daerah penurunan 11,09 ha yang berada di Desa Karang Sari serta penurunan terendah sebesar $2,7 \pm 2,0$ cm/tahun pada STA 18 dengan luas area penurunan 7,41 ha yang berada di Desa Dukun. Luas area yang mengalami penurunan muka tanah adalah 42,55 ha (74,3%) dari luasan total area pembangunan jalan tol STA 17-22. Perubahan volume yang terjadi pada tanggal 30 Agustus hingga 11 Oktober tahun 2020 di sepanjang wilayah pembangunan jalan tol mengalami kenaikan volume sebesar $92.824,42 \text{ m}^3$ akibat penimbunan selama rentang waktu akuisisi foto. Secara visual, perubahan volumetrik yang cukup signifikan terjadi pada STA 20 yang mengalami pengurangan volume (*cut*) dimana perubahan elevasi DEM di STA 20 mencapai $1,43 \pm 0,14 \text{ m}$ pada area akses jalan.

Kata Kunci : DInSAR, Kecamatan Karangtengah, Penurunan Muka Tanah, UAV

ABSTRACT

*Karangtengah sub-district is one of the sub-districts that is vulnerable land subsidence as a result of alluvial sedimentation that dominate in Batu, Kedunguter, Dukun, Karang Sari, Grogol, and Pulosari villages. Regarding the land subsidence phenomenon, construction of the Semarang-Demak toll road currently works at STA 17-22 in this location. This research uses the DInSAR (Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar) method to measure land subsidence rates and the use of UAVs to obtain land volumetric change information using the Digital Elevation Model (DEM) data that occurred during the study period in the toll road construction area. The results of DInSAR processing in August-October showed land subsidence movement with the highest subsidence occurring at STA 20 of $7.1 \pm 2.4 \text{ cm/year}$, with an area of 11.09 ha of subsidence in Karang Sari Village and the lowest subsidence of $2.7 \pm 2.0 \text{ cm/year}$ at STA 18 with subsidence in area of 7.41 ha in the Dukun Village. The area of land subsidence that occurred was 42.55 ha (74.3%) of the total area of the STA 17-22 toll road construction area. Land volume changes from 30 August to 11 October along the toll road construction area indicate an increase of $92,824.42 \text{ m}^3$ due to stockpiling activities during the photo acquisition period. Visually, significant volumetric changes occurred at STA 20 which experienced a volume reduction (*cut*) where the change in DEM elevation at STA 20 reached $1.43 \pm 0.14 \text{ m}$ in the road access area.*

Keywords : DInSAR, Land Subsidence, Karangtengah District, UAV

^{*) Penulis Penanggung Jawab}

I. Pendahuluan

I.1 Latar Belakang

Kecamatan Karangtengah merupakan salah satu kecamatan yang rentan terhadap peristiwa Penurunan Muka Tanah (PMT). Penurunan muka tanah yang terjadi di Kecamatan Karangtengah setiap tahunnya terjadi akibat dari endapan alluvial muda yang berada di sepanjang pantai Demak, pantai Utara Jawa (Sumiarsih, 2016). Hal ini juga diikuti oleh peristiwa banjir rob di sejumlah wilayah. Adapun kerugian per tahun yang dihasilkan dari peristiwa penurunan muka tanah ini mencapai 10 miliar rupiah. Menurut Andreas, dkk. (2018) penurunan Muka Tanah di daerah Semarang dan Demak mengalami penurunan muka tanah sebesar 1 hingga 15 cm setiap tahun.

Terkait peristiwa penurunan muka tanah yang rentan terjadi di daerah Demak, di lokasi ini juga sedang dilakukan pembangunan jalan tol Semarang- Demak. Nantinya pada jalan tol ini juga akan diintegrasikan dengan tanggul laut sepanjang 8 km yang terbentang dari Kaligawe-Sayung. Hal ini dilakukan untuk mengatasi permasalahan banjir rob yang sering terjadi akibat peristiwa penurunan muka tanah. Selain itu tujuan pembangunan jalan tol ini juga berkaitan dengan peraturan Menteri Perhubungan yang akan mengintegrasikan seluruh akses di Jawa dengan jalan tol.

Salah satu kecamatan di Demak yang dilalui jalur jalan tol Semarang-Demak ini yaitu kecamatan Karang Tengah. Pembangunan jalan tol di kecamatan Karang Tengah melewati Desa Batu, Wonokerto, Kedunguter, Dukun, Karang Sari, Pulosari, dan Grogol. Dalam tahap pengawasan pembangunan jalan tol ini perlu dilakukan studi mengenai penurunan muka tanah untuk dijadikan bahan rujukan dalam mengawasi serta pemeliharaan kondisi jalan tol di masa depan. Wilayah pada penelitian ini tidak mencakup semua desa, dikarenakan proses pembangunan jalan tol belum dilaksanakan di semua desa yang ada di kecamatan Karangtengah.

Pada penelitian ini metode yang digunakan untuk mendapatkan nilai penurunan muka tanah menggunakan metode DInSAR (*Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar*) karena dapat dilakukan secara cepat walaupun pada wilayah yang luas. Penggunaan UAV dilakukan untuk mendapatkan informasi perubahan volumetrik dengan menggunakan data *Digital Elevation Model* (DEM) yang terjadi selama rentang waktu penelitian pada wilayah pembangunan jalan tol. Bentuk jalan tol yang memanjang membutuhkan waktu yang cukup lama untuk pengambilan data lapangan. Untuk itu, penggunaan UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) menjadi alternatif yang sangat baik dilakukan untuk mendapatkan perubahan volumetrik lapangan karena UAV dapat mengefisiensi waktu serta biaya yang dikeluarkan. Hasil dari pengolahan data DEM juga dilakukan validasi dengan data *cross section* untuk dapat mengetahui ketelitian dari topografi di lapangan. Pengambilan data UAV dilakukan secara multitemporal dengan dua temporal waktu yang berbeda. Melalui

penelitian penurunan muka tanah menggunakan metode DInSAR dan UAV pada proyek pembangunan jalan tol Semarang-Demak di Kecamatan Karangtengah, diharapkan dapat meningkatkan penggunaan DInSAR serta UAV dalam proses identifikasi penurunan muka tanah. Selain itu dapat membantu pihak terkait dalam mengambil kebijakan serta keputusan dalam melakukan perencanaan untuk mengatasi permasalahan yang sering terjadi akibat peristiwa penurunan muka tanah di sejumlah wilayah.

I.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana analisis nilai Penurunan Muka Tanah sepanjang area penelitian jalan tol di Kecamatan Karangtengah dengan menggunakan metode DInSAR?
2. Bagaimana analisis volumetrik sepanjang area penelitian jalan tol di Kecamatan Karangtengah dengan menggunakan UAV?
3. Bagaimana analisis perubahan volumetrik dengan hasil penurunan DInSAR?

I.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

1. Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini, antara lain:

- a. Mengetahui nilai penurunan muka tanah dengan menggunakan metode DInSAR sepanjang area penelitian jalan tol di Kecamatan Karangtengah.
- b. Mengetahui analisis volumetrik sepanjang area penelitian jalan tol di kecamatan Karang Tengah dengan menggunakan UAV
- c. Mengetahui analisis perubahan volumetrik dengan hasil penurunan DInSAR

2. Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian ini, antara lain:

- a. Segi kerekayasaan
Penelitian ini dapat menjadi salah satu rujukan dalam perencanaan, pembuatan kebijakan serta pengambilan keputusan dalam pembangunan jalan tol Semarang-Demak..
- b. Segi keilmuan
Dapat mengembangkan khazanah keilmuan mengenai studi penurunan muka tanah dengan metode DInSAR dan UAV di dalam ilmu geodesi.

I.4 Batasan Penelitian

Adapun batasan dalam penelitian ini melingkupi sebagai berikut:

1. Metode yang digunakan untuk analisis penurunan muka tanah menggunakan metode DInSAR yang merupakan data primer.
2. Analisis hasil perubahan volumetrik menggunakan metode UAV yang merupakan data primer.
3. Untuk analisis PMT dan volumetrik dilakukan tanpa adanya kajian secara geologis.

4. Interval waktu akuisisi pada foto udara yaitu 40 hari pada tanggal 30 Agustus dan 11 Oktober 2020
5. Interval waktu akuisisi citra SAR yaitu pada bulan Agustus dan Oktober.
6. Ketinggian terbang saat akuisisi UAV 120 meter mengacu pada Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 37 Tahun 2020 tentang Pengendalian Pengoperasian Pesawat Tanpa Awak.
7. Luaran dari penelitian ini yaitu Peta PMT di sepanjang STA 17-22 wilayah pembangunan jalan tol Semarang-Demak.

I.5 Ruang Lingkup Penelitian

Wilayah penelitian ini berada di Kecamatan Karangtengah, Kabupaten Demak berada diantara koordinat 6°51'42,4"-6°56'44" LS dan 110°30'48"-110°38'22,5"BT. Wilayah penelitian yang menjadi fokus penelitian ini berada pada area pembangunan jalan tol STA 17 hingga STA 22.



Gambar I-1 Wilayah Penelitian

I.6 Data dan Peralatan Penelitian

Adapun data dan peralatan yang digunakan dalam penelitian sebagai berikut :

a. Data Penelitian

Tabel I-1 Perangkat Lunak

No.	Data	Jenis Data	Waktu	Sumber
1.	Citra Sentinel-1	Sekunder	2020	Website ASF
2.	Foto udara UAV	Primer	2020	Akuisisi Lapangan
3.	Data GPS GCP dan ICP	Primer	2020	Akuisisi Lapangan
4.	Data CORS CSEM	Sekunder	2020	Badan Infomasi Geospasial
5.	Data cross section	Sekunder	2020	Surveyor PT.PP

b. Peralatan Penelitian

- Perangkat keras

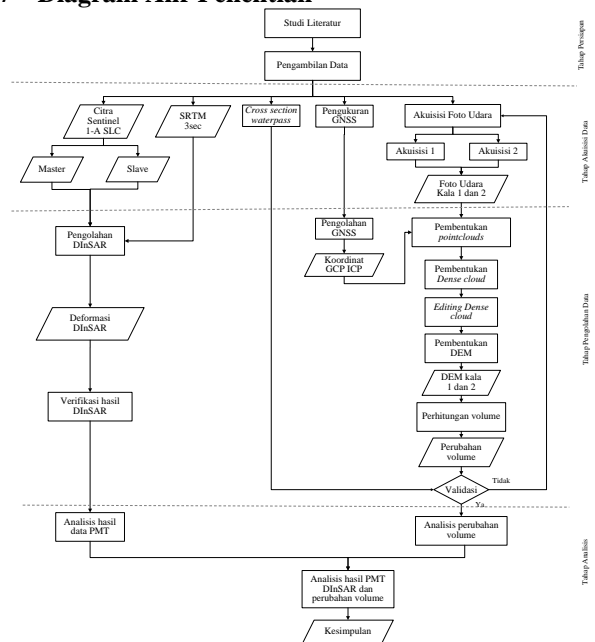
1. Laptop Asus A456U Intel Core i5-7200U, RAM 8 GB, 64bit, OS Windows 10
2. Workstation HP Intel core i7, RAM 12 GB, 64bit, OS Windows 10
3. DJI Phantom 4 Pro

4. GNSS Topcon HiPER II Base, Rover, dan antenna receiver GNSS Topcon HiPER II
 5. GNSS Topcon SR Base, Rover, dan antenna receiver GNSS Topcon SR
- Perangkat Lunak

Tabel I-2 Perangkat Lunak

No.	Perangkat Lunak	Kegunaan
1.	SNAP Desktop 7.0	Pengolahan DInSAR
2.	SNAPHU	Proses <i>Unwrapped</i>
3.	Agisoft Metashape	Pengolahan foto udara menjadi DEM
4.	ArcGIS 10.3.1	Analisis deformasi DInSAR dan <i>layouting</i>
5.	Global Mapper v17.0	Analisis volumetrik DEM
6.	Topcon tools 8.2	Pengolahan data GNSS
7.	Microsoft Office	Pembuatan laporan

I.7 Diagram Alir Penelitian



Gambar I-2 Diagram Alir Penelitian

II. Tinjauan Pustaka

II.1 Gambaran Umum Wilayah Penelitian

Penelitian ini mencakup Desa Batu, Wonokerto, Kedunguter, Dukun, Karang Sari, Pulosari. Adapun batas wilayah pada penelitian ini hanya terbatas pada wilayah pembangunan jalan tol dari STA 17 hingga STA 22 dikarenakan STA tersebut yang sudah mulai dilakukan proses pembangunan pada saat penelitian berlangsung. Wilayah ini berada pada diantara

koordinat 6°56'11,90" LS - 6°55'44,04" LS dan 110°33'52,81"BT - 110°36'57,28"BT.

Wilayah Kecamatan Karangtengah memiliki Struktur geologi Aluvial kelabu yang sama dengan struktur yang mendominasi di Kabupaten Demak. Kondisi topografi juga berada di dekat pantai Utara Jawa yang sangat rentan terhadap peristiwa penurunan muka tanah. Berdasarkan penelitian Heri Andreas, dkk pada tahun 2018 ditemukan bahwa setiap tahunnya Kabupaten Demak mengalami penurunan 1-20 cm.

II.2 Penurunan Muka Tanah

Penurunan Muka Tanah (PMT) suatu proses gerakan pada permukaan tanah yang menyebabkan perubahan kedudukan suatu titik. Peristiwa pergeseran titik di permukaan bumi dapat terjadi secara vertikal namun dapat juga terjadi secara horizontal (Whittaker dan Reddish 1989). Peristiwa ini dapat terjadi secara lokal dan regional. Turunnya permukaan tanah yang terakumulasi selama rentang waktu tertentu akan dapat mencapai besaran penurunan hingga beberapa meter lebih cepat (Prasetyo dan Subiyanto 2014). Terdapat beberapa faktor penyebab penurunan muka tanah, sebagai berikut :

1. Penurunan Muka Tanah secara alami meliputi siklus geologi yang terjadi dan adanya sedimentasi pada daerah cekungan.
2. Pengambilan air tanah secara berlebihan
3. Penurunan akibat beban berat bangunan
4. Penurunan akibat pengambilan bahan padat dari tanah (penambangan berlebihan)

II.3 DInSAR

Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR) merupakan teknik interferometrik untuk mengetahui pergerakan permukaan tanah dengan cara mengurangi perbedaan fasa antara dua citra SAR dengan perkiraan posisi yang sama di ruang angkasa pada waktu yang berbeda (Massonet dan Feigl, 1998). Interferogram menunjukkan perbedaan fasa yang ditunjukkan dari perbedaan jarak yang diukur dengan *line of sight* (LOS) radar mencakup topografi, pergeseran orbit, deformasi permukaan, dan efek atmosfer (Castañeda, dkk., 2011).

Deformasi yang didapatkan pada metode InSAR terjadi pada arah LOS pada dua citra SAR yang menghasilkan perpindahan fasa. Untuk mendapatkan deformasi pada interferogram dilakukan perkalian konjugasi antara citra master dan citra slave. Perbedaan fasa interferometri antara dua data SAR sebanding dengan perbedaan jarak miring R dan dibagi dengan panjang gelombang λ (Razi, 2020).

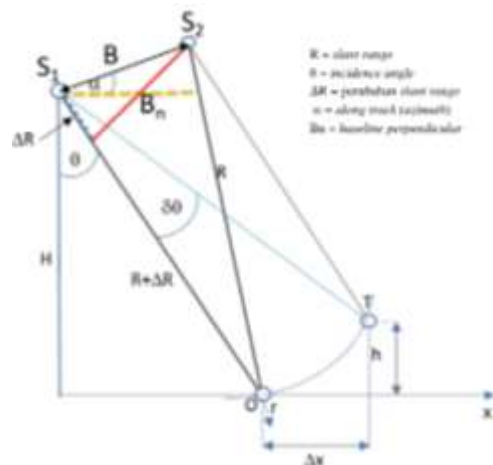
Perhitungan nilai fasa dapat dilihat pada persamaan II.1 dan II.2.

$$\varphi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} R \dots\dots\dots(II.1)$$

$$\varphi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} (R + \Delta R) \dots\dots\dots(II.2)$$

Sehingga fasa perpindahan dirumuskan pada persamaan II.3.

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R \dots\dots\dots(II.3)$$



Gambar II-1 Konsep DInSAR

Dengan mengasumsikan deformasi hanya terjadi pada arah vertikal dan sudut datang (*incidence angle*) kira-kira sama dengan sudut nadir sensor (*sensor off-nadir angle*) maka perpindahan tanah secara vertikal didapatkan melalui persamaan berikut ini:

$$dz_{i,j} = \frac{1}{\cos\theta'} \left(\frac{h \cdot B_p}{R \cdot \sin \alpha} + \frac{\lambda \phi}{4\pi} B_n \right) \dots\dots\dots(II.4)$$

Keterangan:

- $dz_{i,j}$ = perpindahan vertikal
- h = informasi topografi
- R = slant range
- θ = incidence angle
- B_n = baseline perpendicular
- α = sudut nadir

II.4 Faktor Koherensi Citra SAR

Dalam Adragna (2010) dijelaskan bahwa terdapat 4 faktor yang mempengaruhi koherensi suatu citra, yaitu:

- a. Dekorelasi Temporal
Perbedaan waktu pada saat perekaman citra menjadikan adanya perubahan objek yang diamati diantaranya perubahan vegetasi, pergerakan permukaan tanah, serta aktivitas manusia.
- b. Dekorelasi Geometri
Penggunaan dua citra yang diperoleh dari dua akuisisi yang berbeda menghasilkan frekuensi yang dibawa menjadi bervariasi. Hal ini karena jumlah *reflector* yang berbeda sehingga fase juga akan termodifikasi.
- c. Dekorelasi Atmosfer
Pada lapisan troposfer dapat menimbulkan kesalahan jarak karena adanya indeks bias, menyebabkan pemanjangan gelombang karena kecepatan gelombang menjadi rendah daripada kecepatan cahaya. Pada lapisan ionosfer menyebabkan lintasan garis edar memendek karena penyimpangan kerapatan elektron.
- d. Dekorelasi Suhu
Perubahan nilai SNR terjadi karena proses penguatan dari sinyal radar yang diterima oleh antena akibat perubahan suhu.

II.5 Unmanned Aerial Vehicle

Pesawat tanpa awak (*Unmanned Aerial Vehicle/ UAV*) merupakan wahana dalam pengukuran fotogrametri yang dapat beroperasi dari jarak jauh secara semi-otonom atau otonom tanpa adanya seorang pilot di dalam wahana yang bertugas untuk mengendalikan (Eisenbeiss 2009). Wahana ini dilengkapi dengan sistem pengukuran fotogrametri yang biasanya menggunakan kamera digital namun bisa juga video dalam ukuran kecil ataupun sedang, sistem kamera termal atau inframerah, sistem LiDAR atau kombinasi dari sistem tersebut.

II.6 Orthorektifikasi

Orthorektifikasi merupakan suatu proses koreksi skala antar titik dan pergeseran relief akibat adanya variasi elevasi antara wahana dan topografi (Hadi, 2007). Proses ini dilakukan untuk mengubah proyeksi citra/foto perspektif sentral menjadi proyeksi orthogonal melalui proses transformasi. Proses pertama dalam orthorektifikasi yaitu proses triangulasi yang bertujuan untuk mengoreksi orientasi sensor dan proses kedua yaitu proses koreksi terhadap pergeseran relief (Aguilar, dkk., 2013). Pada saat melakukan proses orthorektifikasi diperlukan suatu model elevasi digital dan juga titik kontrol tanah.

II.7 Hasil Penegakan Foto Udara

II.7.1 Orthopoto

Orthopoto merupakan foto yang menyajikan gambaran objek pada posisi orthografik yang benar (Wolf, dkk., 1993). Pada orthopoto tidak ada pergeseran letak gambar yang disebabkan oleh kemiringan posisi sensor dan variasi relief topografi karena sudah melalui proses orthorektifikasi. Ortofoto dibentuk berdasarkan foto stereomodel, yaitu pembuatannya model demi model.

II.7.2 DEM

DEM merupakan data digital yang menggambarkan geometri dari bentuk permukaan bumi atau bagiannya yang terdiri dari himpunan titik-titik koordinat hasil sampling dari permukaan dengan algoritma yang mendefinisikan permukaan tersebut menggunakan himpunan koordinat (Templi, 1991). DEM digunakan untuk memvisualisasikan keadaan sebenarnya di permukaan bumi dalam bentuk tiga dimensi.

III. Metodologi Penelitian

III.1 Akuisisi Data

Akuisisi data yang dilakukan terbagi atas dua tahap utama yaitu pengumpulan data citra dan akuisisi lapangan meliputi akuisisi data GNSS untuk pengambilan titik GCP dan ICP serta akuisisi data foto udara UAV.

III.1.1 Pengumpulan data Citra

Pengumpulan data dilakukan secara daring melalui *website* <https://vertex.daac.asf.alaska.edu>. Data dalam pengolahan DInSAR ini menggunakan 2 buah citra Sentinel-1 SLC dengan mode akuisisi IW dan

polarisasi ganda VV dan VH, arah perekaman *Descending*. Adapun waktu akuisisi citra masing-masing citra pada bulan Agustus dan Oktober.

III.1.2 Akuisisi GNSS

Tahapan akuisisi GNSS dilakukan dengan pembuatan patok beton terlebih dahulu sebanyak 4 buah pada titik GCP. Terdapat 8 titik GCP dan 5 titik ICP yang diamati. Metode pengamatan yang dilakukan pada titik GCP dan ICP yaitu menggunakan metode rapid statik dengan lama pengamatan titik GCP ± 1 jam dan titik ICP selama ± 10 menit. Pada proses pengolahan untuk mendapatkan koordinat dilakukan dengan metode radial.



Gambar III-1 Persebaran titik GCP dan ICP

III.1.3 Akuisisi data UAV

Akuisisi data UAV dilakukan sesuai dengan perencanaan jalur terbang yang telah dibuat sebelumnya sesuai batas daerah penelitian. Terdapat 10 jalur terbang pada penelitian ini.



Gambar III-2 Perencanaan jalur terbang

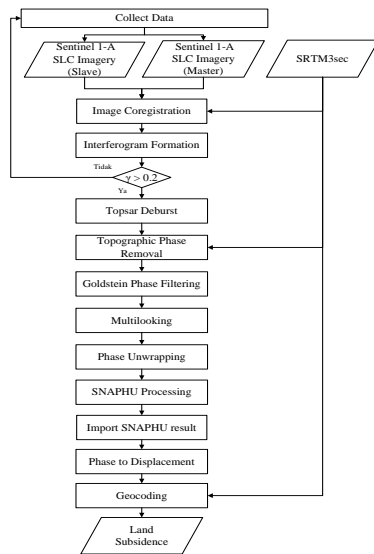
Sebelum akuisisi perlu untuk melakukan kalibrasi terlebih dahulu pada UAV. Kemudian memastikan rencana jalur terbang pada aplikasi Drone Deploy, dimana parameter sidelap 60%, overlap 75%, dan tinggi terbang 100 meter yang sudah sesuai pada perencanaan sebelumnya. Jumlah foto yang dihasilkan pada penelitian ini yaitu 2122. Jumlah foto kala I menghasilkan 1245 foto yang dilakukan pada tanggal 30 Agustus 2020 dan untuk pemotretan kala II menghasilkan 877 foto yang dilakukan pada tanggal 11 Oktober 2020.

III.2 Tahapan Pengolahan Data

III.2.1 Pengolahan DInSAR

Pada pemrosesan DInSAR terdiri dari estimasi *baseline* citra SAR, koregistrasi citra (pemilihan area), pembentukan interferogram, proses DInSAR, *filtering*, *multilooking*, proses *unwrapping*, *phase to*

displacement dan geocoding. Pengolahan dilakukan dengan citra Sentinel 1-A SLC serta DEM SRTM 3Sec. Hasil DInSAR yang masih berada pada satuan LOS juga harus di konversi ke nilai perpindahan vertikal.



Gambar III-3 Diagram Alir Pengolahan DInSAR

III.2.2 Pengolahan Data GNSS

Pada pengolahan data GNSS harus dilakukan konversi terlebih dahulu dari data hasil pengamatan GNSS yang berformat TPS agar menjadi format RINEX. Pengolahan data dilakukan pada perangkat lunak Topcon tools. Pada pengolahan data GNSS digunakan data CORS CSEM BIG sebagai base.

III.2.3 Pengolahan volume pada data foto udara

Pengolahan untuk mendapatkan data volume dilakukan dengan pembangunan DEM dari foto udara terlebih dahulu. Lalu menghitung perubahan volume yang terjadi pada kedua DEM dari bulan Agustus 2020 dan Oktober 2020. Pembangunan DEM dilakukan pada perangkat lunak Agisoft Metashape dimana dilakukan pada *points* yang masuk pada klasifikasi ground saja.

Perhitungan volume terbagi atas dua proses yaitu perhitungan volume *cut* dan *fill* kala I dan II dengan menggunakan *base height* yang sama. Kemudian kedua DEM diproses dengan melakukan eliminasi antara DEM kala pertama dan kedua sehingga dapat menampilkan volume total perubahan dari data *cut* dan *fill*. Data *cut* dan *fill* dapat menunjukkan data deformasi yang terdapat pada kedua DEM, dimana data *cut* sebagai data penurunan muka tanah dan data *fill* sebagai data kenaikan muka tanah.

III.2.4 Perubahan volume terhadap hasil DInSAR

Perubahan volume yang terdapat pada dua DEM yaitu dengan memvisualisasikan data *cut* dan *fill* agar terlihat perubahan dari kedua DEM dengan hasil penurunan DInSAR. Nilai perubahan yang lebih nyata dilakukan dengan perhitungan perubahan elevasi pada DEM kala I dan II. Perhitungan perubahan elevasi DEM dilakukan di sepanjang area timbunan jalan tol dan juga pada jalan akses ke timbunan di setiap STA dengan jarak antar titik 100 meter.

Untuk melihat kualitas dari data DEM yang digunakan untuk mendapatkan perubahan volumetrik maka dilakukan validasi. Metode validasi yang digunakan untuk menganalisis kualitas DEM yang terbentuk yaitu membandingkan data *cross section* waterpass dengan *cross section* dari DEM.

IV. Hasil dan Analisis

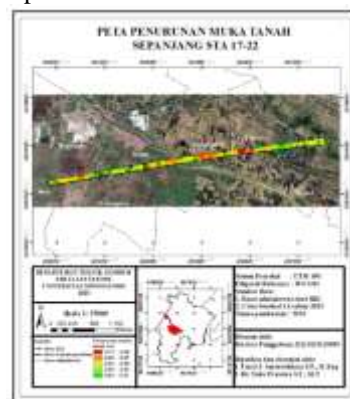
IV.1 Hasil dan Analisis Pengolahan DInSAR

Hasil dari pengolahan pada bulan Agustus-Oktober 2020 menampilkan pola penurunan muka tanah pada wilayah penelitian setiap STA memiliki nilai penurunan yang cukup tinggi. Nilai penurunan tertinggi terjadi pada STA 20 dengan nilai penurunan rata-rata sebesar 7,1±2,4 cm/tahun dengan luas wilayah area terdampak sebesar 9,68 ha. Adapun nilai penurunan terendah terjadi pada STA 18 dengan nilai penurunan rata-rata sebesar 2,7±2,0 cm/tahun dengan luas area terdampak 7,41 ha. Hasil penurunan muka tanah rata-rata di setiap Desa yang dilalui oleh proyek pembangunan jalan tol pada kisaran 5-6 cm/tahun. Terlihat pada STA 20 terdapat peningkatan penurunan pada area proyek namun pada STA 18 tidak terjadi peningkatan dikarenakan pada STA 18 sedang dilakukan proses penimbunan begitu juga pada STA 21 dan 22. Dari tabel dapat dilihat bahwa terdapat pengaruh penurunan muka tanah di sekitar wilayah Desa akibat adanya proyek jalan tol sebesar 0,1-1,1 cm/tahun. Total luasan penurunan muka tanah adalah 42,55 ha (74,3%) dari total luasan area pembangunan jalan tol STA 17-22.

Tabel IV-1 Penurunan muka tanah STA 17-22

Area	Minimum	Maksimum	Rata-rata	Luas area terdampak (%)
	(cm/tahun)	(cm/tahun)	(cm/tahun)	
STA 17	0,01	10,4	5,6	90,9
STA 18	0,01	8,2	2,7	70,30
STA 19	0,01	9,5	6,1	95,29
STA 20	0,01	12,9	7,1	93,38
STA 21	0,01	13,1	4,7	92,59
STA 22	0,01	9,4	4,6	91,20

Hasil dari pengolahan DInSAR dapat dilihat pada peta penurunan muka tanah sepanjang STA 17-22 yang tertera pada Gambar IV-1.



Gambar IV-1 Penurunan tanah sepanjang STA 17-22

Penurunan muka tanah yang tinggi di hampir seluruh wilayah dikarenakan wilayah pembangunan jalan tol yang berada di Kecamatan Karangtengah termasuk daerah pesisir Demak yang memiliki struktur geologi yaitu tanah aluvium yang rentan terhadap

peristiwa penurunan muka tanah. Hal ini menyebabkan konsolidasi yang terjadi pada tanah lunak yang mendapat pembebanan dari bulan Agustus dan Oktober menghasilkan penurunan yang begitu tinggi. Kemudian dilakukan pengecekan ke lapangan mengenai kondisi sebenarnya dengan mengambil beberapa titik sampel di setiap STA yang mewakili setiap Desa yang dilalui jalan tol baik pada area timbunan maupun titik-titik diluar timbunan. Titik sampel tidak hanya diambil pada area timbunan agar dapat memperlihatkan bahwa peristiwa penurunan juga terjadi di setiap Desa yang dilalui jalan tol. Tabel hasil verifikasi data DInSAR dapat dilihat pada Tabel IV-2.

Tabel IV-2 Contoh dokumentasi setiap STA

Koordinat (Lat,Lon)	STA	Penurunan tanah (cm/tahun)	Verifikasi	Dokumentasi
457266,249; 9233566,701	22	2-5	Terjadi penurunan	
456741,692 ; 9234029,471	21	3-4	Terjadi penurunan	
454935,581 ; 9233810,500	20	8-9	Terjadi penurunan	
454132,590 ; 9233667,085	19	1-8	Terjadi penurunan	
453776,624; 9233676,697	18	3-4	Terjadi penurunan	
452245,192; 9233326,677	17	7-8	Terjadi penurunan	

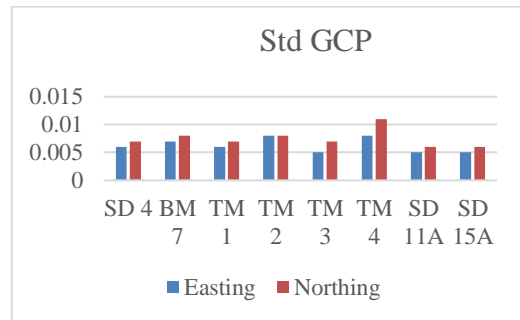
IV.2 Hasil dan Analisis volume pada foto udara

IV.2.1 Hasil dan analisis akuisisi koordinat GCP dan ICP

Hasil koordinat GCP dan ICP dari pengukuran GNSS menghasilkan koordinat definitif, standar deviasi serta RMS. Koordinat definitif yaitu koordinat *fix* suatu titik yang digunakan dalam proses orthorektifikasi foto udara.

Tabel IV-3 Koordinat GCP

Nama	X (m)	Y (m)	Z (m)
SD 4	451881,142	9233142,184	1,182
BM 7A	452695,410	9233290,288	1,510
TM 1	453630,871	9233592,465	1,327
TM 2	454772,771	9233792,398	1629
TM 3	455973,804	9233955,619	2,161
TM 4	457322,482	9234110,031	4,512
SD 11A	455520,742	9233780,262	0,209
SD 15A	457465,251	9234009,933	2,743

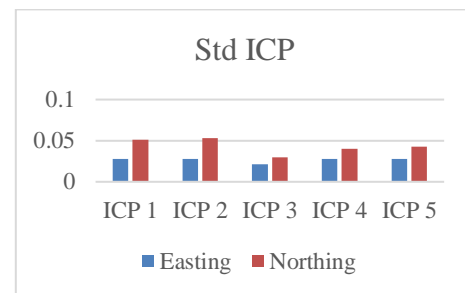


Gambar IV-2 Grafik standar deviasi GCP

Pada titik GCP deviasi terendah terletak pada titik TM 3 yaitu dengan standar deviasi X dan Y secara berurutan sebesar 0,005 dan 0,007. Kemudian nilai deviasi tertinggi berada pada titik TM 4 yang memiliki standar deviasi secara berurutan sebesar 0,008 dan 0,011 hal ini dikarenakan titik berada dekat dengan pohon.

Tabel IV-4 Koordinat ICP

Nama	X (m)	Y (m)	Z (m)
ICP 1	457530,662	9234110,667	4,959
ICP 2	453269,017	9233512,731	0,252
ICP 3	454487,529	9233752,532	3,079
ICP 4	452646,304	9233328,991	1,835
ICP 5	452112,931	9233184,515	2,488



Gambar IV-3 Grafik standar deviasi ICP

Untuk titik ICP nilai deviasi terendah terletak pada ICP 3 dengan standar deviasi X dan Y secara berurutan yaitu 0,021 m dan 0,03 m. ICP dengan standar deviasi tertinggi yaitu ICP 2 memiliki standar deviasi X dan Y secara berurutan yaitu 0,028 m dan 0,051 m hal ini dikarenakan pada ICP 2 yang dekat dengan bangunan sehingga memungkinkan terjadinya *multipath*.

IV.2.2 Hasil dan analisis akuisisi foto udara

Resolusi spasial yang dihasilkan dari orthophoto sebesar 2,8 cm/piksel dengan tinggi terbang rata-rata dari keseluruhan jalur adalah 118 meter. Proses yang harus dilakukan pertama kali pada foto udara yaitu proses *align photos* untuk menghasilkan *pointclouds* yang masih jarang (*sparse clouds*) atau *point* pendekatan. Fungsi dari proses *align* untuk mendapatkan posisi kamera dan orientasi dari setiap foto sehingga titik-titik yang terbentuk sudah terkoreksi kesalahan *drift*, *tilt* maupun *crab*. Pemilihan jumlah *tie point* pada pemrosesan yaitu 4000 titik per foto agar tidak menghabiskan waktu yang lama pada saat proses *align photos*. Didapatkan hasil rektifikasi foto udara dengan nilai total error pada kala pertama sebesar 1,9 cm dan kala kedua sebesar 1,7 cm.

Kemudian melakukan pembentukan *dense clouds* (*point clouds* padat) yang menghasilkan *point clouds* yang lebih banyak. Dari data *dense clouds* digunakan untuk pembentukan DEM. Pada hasil DEM dilakukan pengecekan hasil elevasi GCP pada DEM dari kala 1 dan 2 yang dibandingkan dengan elevasi GNSS untuk mengetahui nilai RMSe hasil pengolahan DEM tersebut. Hasil RMSe menunjukkan nilai 30,8 cm dan 8,1 cm pada DEM kala pertama dan kedua secara berurutan.

Tabel IV-5 Perbandingan GCP dari GPS dan DEM kala 1

GCP	Elevasi GPS (m)	DEM kala I (m)	dz (m)	dz ² (m)
SD 4	1,182	1,151	-0,031	0,0009
BM 7A	1,51	1,526	0,016	0,0002
TM 1	1,327	1,372	0,045	0,0020
TM 2	1,629	1,657	0,028	0,0007
SD 11A	0,209	1,024	0,815	0,6642
TM 3	2,161	2,224	0,063	0,0039
TM 4	4,512	4,702	0,190	0,0361
SD 15A	2,743	2,971	0,228	0,0519
Jumlah				0,7603
Rata-rata				0,0950
RMSe				0,3082
LE90				0,5086

Tabel IV-6 Perbandingan GCP dari GPS dan DEM kala 2

GCP	Elevasi GPS (m)	DEM kala II (m)	dz (m)	dz ² (m)
SD 4	1,182	1,219	0,037	0,0013
BM 7A	1,51	1,452	-0,058	0,0033
TM 1	1,327	1,358	0,031	0,0009
TM 2	1,629	1,599	-0,03	0,0009
SD 11A	0,209	0,017	-0,192	0,0368
TM 3	2,161	2,195	0,034	0,0011
TM 4	4,512	4,483	-0,029	0,0008
SD 15A	2,743	2,833	0,09	0,0081
Jumlah				0,0535
Rata-rata				0,0066
RMSe				0,0818
LE90				0,1349

Pengujian menggunakan Peraturan kepala BIG No.6 tahun 2018 dihasilkan pada DEM kala I dan DEM kala II memenuhi standar ketelitian peta dasar dengan ketelitian vertikal kelas 1 dengan kelas peta 1:1000.

Analisis ketelitian foto udara juga mengacu pada Peraturan Kepala BIG no 6 tahun 2018 untuk melihat ketidakpastian posisi pada objek hasil pengolahan dengan koordinat posisi di lapangan. Uji ketelitian ini menggunakan 5 titik ICP sebagai titik *check*. Ketelitian dihitung ke dalam nilai CE90 dan LE90. Nilai CE90 dan LE90 diperoleh dengan rumus yang mengacu pada standar USNMAS (*United States National Map Accuracy Standards*).

Tabel IV-7 Hasil uji CE90

Orthophoto	RMSEhorizontal (m)	CE90 (m)	Skala peta	Kelas peta
Kala I	0,0662	0,1005	1 : 1000	I
Kala II	0,0098	0,0149	1 : 1000	I

Tabel IV-8 Hasil uji LE90

Orthophoto	RMSEvertikal (m)	LE90 (m)	Skala peta	Kelas peta
Kala I	0,0263	0,0433	1 : 1000	I
Kala II	0,00382	0,0063	1 : 1000	I

IV.2.3 Hasil dan analisis volume

Perhitungan volume dilakukan dengan menghitung keseluruhan dari volume DEM kala I dan kala II untuk mendapatkan nilai perubahan antara kedua DEM. Dari perhitungan ini didapatkan volume perubahan *cut* pada DEM kala I dan II sebesar 93635,39 m³ dan perubahan volume *fill* pada DEM kala I dan II sebesar 186459,81 m³. Kemudian volume *fill* dikurangi dengan volume *cut* untuk melihat perubahan volume dari kedua DEM. Nilai perubahan volume merupakan nilai positif yang menunjukkan bahwa terjadi kenaikan muka tanah sebesar 92.824,42 m³ selama 40 hari di area pembangunan jalan tol. Hal ini dikarenakan selama bulan Agustus hingga Oktober pada area jalan tol masih terus dilakukan kegiatan penimbunan dimana luas perubahan wilayah *cut* (pengurangan) sebesar 182876,5 m² dan luas wilayah *fill* (penambahan) sebesar 205797,3 m². Kemudian analisis perubahan volumetrik dilakukan dengan membandingkan visualisasi dari DEM kala I dan kala 2 dengan kondisi nyata yang terdapat pada orthophoto. Hasil ini untuk memperlihatkan perubahan volumetrik pada setiap STA.

IV.3 Hasil dan Analisis perubahan volume terhadap hasil DInSAR

IV.3.1 Analisis perubahan volume

Analisis perubahan volume dilakukan dengan melihat perubahan elevasi dari timbunan selama selang waktu 40 hari serta visualisasi dari data *cut* dan *fill* sepanjang area penelitian. Dapat dilihat melalui data elevasi DEM menunjukkan bahwa penurunan elevasi tertinggi dari DEM kala I dengan DEM kala II terjadi pada STA 20 dengan penurunan sebesar 1,43 m yang berada pada akses jalan. Perubahan visualisasi pengurangan volume (*cut*) terbesar juga terjadi pada STA 20. Terlihat dari hasil DInSAR yang menunjukkan bahwa penurunan muka tanah tertinggi selama bulan Agustus hingga Oktober juga terjadi di sekitar area STA 20 dengan penurunan rata-rata 7,1 cm/tahun.

Tabel IV-9 Perubahan elevasi timbunan STA 20

Titik STA	Elevasi DEM (m)		Perubahan Elevasi (m)	Keterangan
	Kala I (Agustus)	Kala II (Oktober)		
20+0	4,438	4,373	-0,06	timbunan
20+100	4,508	4,374	-0,13	timbunan
20+200	4,764	4,221	-0,54	timbunan
20+300	5,054	4,455	-0,59	timbunan
20+400	5,564	4,895	-0,66	timbunan
20+500	2,396	1,316	-1,08	timbunan
20+600	2,405	1,282	-1,12	lintasan jembatan
20+700	2,607	1,834	-0,77	lintasan jembatan
20+800	2,233	1,337	-0,89	lintasan jembatan
20+900	2,167	1,579	-0,58	lintasan jembatan

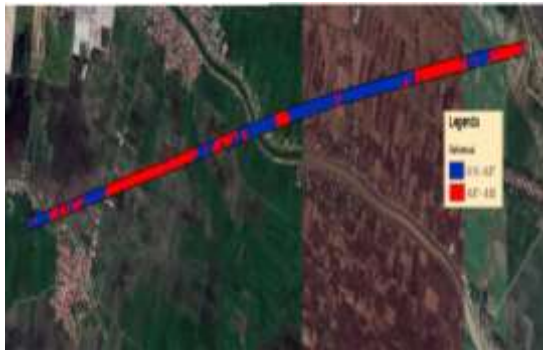
Tabel IV-10 Perubahan elevasi jalan STA 20

Titik STA	Elevasi DEM (m)		Perubahan Elevasi (m)	Keterangan
	Kala I (Agustus)	Kala II (Oktober)		
20	3,005	1,627	-1,37	jalan
20+100	3,068	1,786	-1,28	jalan
20+200	2,992	1,918	-1,07	jalan
20+300	2,909	2,022	-0,88	jalan
20+400	2,513	1,906	-0,60	jalan

Tabel IV-11 Perubahan elevasi jalan STA 20 (lanjutan)

20+500	2,528	2,198	-0,33	jalan
20+600	3,007	1,623	-1,38	jalan
20+700	3,031	1,601	-1,43	jalan
20+800	3,150	1,781	-1,36	jalan
20+900	3,154	1,995	-1,15	jalan

Kemudian perbandingan dilakukan pada hasil visualisasi deformasi metode DInSAR dengan hasil perubahan *cut and fill* pada DEM dari kala I dan II dimana volume *cut* diidentifikasi sebagai data penurunan dan volume *fill* sebagai data kenaikan.



Gambar IV-4 Hasil Penurunan muka tanah DInSAR



Gambar IV-5 Hasil cut and fill DEM kala 1 dan 2

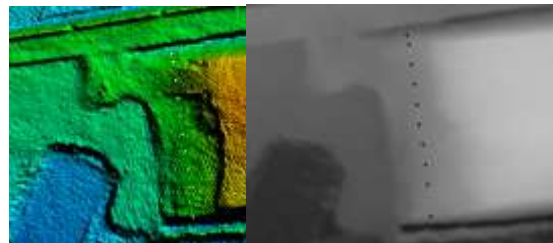
Hasil penurunan DInSAR dengan warna biru menunjukkan penurunan antara 13 cm hingga 7 cm dan warna merah menunjukkan penurunan antara 7 cm hingga 2 cm yang terlihat pada Gambar IV-4 serta hasil perubahan volume *cut fill* kedua DEM dimana pada warna biru menunjukkan data *cut* (penurunan) dan warna merah sebagai data *fill* (kenaikan) yang terlihat pada Gambar IV-5. Melalui hasil tersebut terlihat bahwa hasil yang terbentuk antara keduanya memiliki pola yang sama khususnya pada STA 20 dimana memang terlihat bahwa perubahan luas wilayah *cut* tertinggi juga terjadi pada STA 20. Dari hasil tersebut dapat dikatakan bahwa pada dasarnya memang terjadi penurunan di sepanjang jalur jalan tol walau dalam perubahan volume DEM terjadi penambahan data *fill* dikarenakan area masih terus dilakukan kegiatan penimbunan.

IV.3.2 Validasi volume

Validasi dilakukan menggunakan data *cross section* yang diambil pada tanggal 31 Agustus 2020 pada STA 21 oleh surveyor dari PT.PP. Pengambilan yang hanya tertuju pada STA 21 dikarenakan data pengukuran *cross section* yang dilakukan hanya berselang satu hari dari akuisisi foto udara yaitu pada tanggal 30 Agustus 2020. Penggunaan data *cross*

section pada STA dengan perbedaan jarak waktu akuisisi yang terlalu jauh tidak dilakukan untuk menghindari perbedaan yang signifikan antara data *cross section* dan DEM foto udara dikarenakan terdapat kegiatan oleh alat berat dan wilyah masih terus mengalami pemampatan pada layer timbunan.

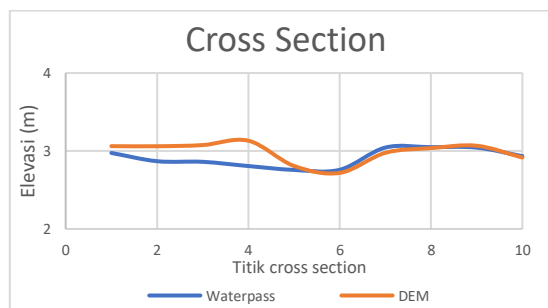
Dari pengukuran tersebut didapatkan elevasi pada 10 titik kemudian data *cross section* dibandingkan dengan data DEM sehingga dapat diketahui nilai ketelitian horizontal dan vertikal sesuai Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial. Nilai RMSe menunjukkan bahwa terdapat kesalahan elevasi sebesar ±0,143 m pada data elevasi DEM.



Gambar IV-6 Titik cross section di lapangan(STA 21)

Tabel IV-12 Perbandingan elevasi *waterpass* dan DEM

Target	Jarak (m)	Elevasi (m)		dz (m)	dz ² (m)
		Waterpass	DEM		
MC0	0	2,975	3,062	-0,087	0,007
1	5	2,869	3,061	-0,192	0,036
2	10	2,861	3,076	-0,215	0,046
3	15	2,807	3,132	-0,325	0,105
4	20	2,757	2,808	-0,051	0,002
5	22,7	2,759	2,719	0,04	0,001
6	5	3,044	2,977	0,067	0,004
7	10	3,049	3,037	0,012	0,0001
8	15	3,043	3,067	-0,024	0,0005
9	23	2,934	2,916	0,018	0,0003
				Total	0,206
				Mean	0,020
				RMSe	0,143



Gambar IV-7 Grafik Statistik *Cross Section* *Waterpass* dan DEM

Melalui grafik perbandingan *cross section* antara data *waterpass* dan DEM foto udara terlihat bahwa dari titik MC0 hingga titik 4 terdapat perbedaan yang cukup signifikan. Hal ini disebabkan pertampalan yang terjadi antar foto udara tidak terlalu baik sehingga menimbulkan kesalahan sistematis pada saat pembentukan permukaan DEM. Namun pada titik 5 hingga 9 terlihat ketinggian sudah menunjukkan komparasi yang relatif sama. Nilai RMSe sebesar 0,143

m menunjukkan bahwa DEM yang diproses dari foto udara sudah cukup baik. Hasil dari pengujian menggunakan peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial dengan melakukan perkalian nilai RMSE dengan CE90 untuk mendapatkan ketelitian horizontal dan LE90 untuk mendapatkan ketelitian vertikal. Maka didapatkan nilai uji horizontal sebesar 0,217 m dan ketelitian vertikal sebesar 0,236 m, dengan nilai ini maka dihasilkan ketelitian yang memenuhi ketelitian peta dasar pada kelas 1 dengan peta skala 1:1000.

V. Kesimpulan dan Saran

V.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah:

1. Penurunan muka tanah (PMT) di sepanjang area jalan tol yang berada di Kecamatan Karang Tengah yang dihasilkan dari pengolahan DInSAR pada bulan Agustus hingga Oktober 2020 menunjukkan nilai penurunan tertinggi sebesar 7,1 cm/tahun pada STA 20 yang berada di Desa Karangsari serta penurunan terendah sebesar 2,7 cm/tahun pada STA 18 berada di Desa Dukun. Luasan penurunan muka tanah yang terjadi adalah 42,55 ha (74,3%) dari luasan total area pembangunan jalan tol STA 17-22.
2. Perubahan volume pada penelitian ini menunjukkan bahwa terdapat kenaikan volume di area pembangunan jalan tol sebesar 92.824,42 m³ dikarenakan selama 40 hari terhitung dari bulan Agustus hingga Oktober area jalan tol masih terus melakukan kegiatan penimbunan dimana luas wilayah pengurangan volume (*cut*) sebesar 182876,5 m² dan luas wilayah penambahan volume (*fill*) sebesar 205797,3 m². Hasil dari perubahan volumetrik yaitu pada STA 17 dan 20 terjadi penurunan pada area timbunan, STA 18 dan 22 terjadi kenaikan pada area timbunan, STA 19 terjadi kenaikan pada area jembatan dan penurunan pada area timbunan, STA 21 terjadi kenaikan dan penurunan area timbunan.
3. Hasil penurunan muka tanah di sepanjang area pembangunan jalan tol dari hasil pengolahan DInSAR tertinggi dan perubahan volumetrik terbesar pada DEM kala I dan II sebagian besar terlihat pada STA 20 menunjukkan bahwa hasil yang terbentuk antara keduanya memiliki pola yang sama dimana wilayah yang mengalami perubahan nilai elevasi (penurunan) tertinggi pada DEM kala I dan II juga terjadi pada STA 20 sebesar 1,43 ± 0,14 m.

V.2 Saran

Hasil penelitian ini ditemukan beberapa saran yang dapat dijadikan masukan untuk penelitian selanjutnya. Berikut adalah beberapa saran yang dapat disampaikan.

1. Pada penelitian selanjutnya agar mengamati pada rentang waktu penungguan penurunan tanah setelah dilakukan layer timbunan.

2. Pada penelitian selanjutnya agar mempertimbangkan kondisi obstruksi pada saat pengamatan GPS.
3. Menggunakan titik GCP dan ICP yang lebih banyak serta menyebar di seluruh area.
4. Pada penelitian selanjutnya menggunakan metode SAR dengan algoritma seperti SBAS atau PS-InSAR.
5. Pada penelitian selanjutnya agar dilakukan pada rentang waktu yang lebih lama.

DAFTAR PUSTAKA

- Aguilar, dkk. 2013. *Assessing Geometric Accuracy of the Orthorectification Process from GeoEye-1 and WorldView-2 Panchromatic Images. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 21 (April): 427–35.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.06.004>.
- Andreas H, Abidin Z, dkk. 2018. *Insight Analysis On Dyke Protection Against Land Subsidence And The Sea Level Rise Around Northern Coast Of Java (Pantura) Indonesia. Geoplanning: Journal of Geomatics and Planning* 5 (1): 101.
<https://doi.org/10.14710/geoplanning.5.1.101-114>.
- Castañeda, dkk. 2011. *Dedicated SAR Interferometric Analysis to Detect Subtle Deformation in Evaporite Areas around Zaragoza, NE Spain. International Journal of Remote Sensing* 32 (7): 1861–84.
<https://doi.org/10.1080/01431161003631584>.
- Eisenbeiss. 2009. *UAV Photogrammetry*.
<https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-005939264>.
- Hadi, B. 2007. *Dasar-Dasar Fotogrametri*. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.
- 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. Teknik* 35 (2): 78–85.
<https://doi.org/10.14710/teknik.v35i2.7184>.
- Razi, P dkk. 2020. *Land Deformation Monitoring Using D-Insar Technique During Lombok Earthquake Observed By Sentinel-1A/B. International Journal of GEOMATE* 19 (73).
<https://doi.org/10.21660/2020.73.37542>.
- Templi, K. 1991. *DTM and Differential Modelling. ISPRS and OEEPE Joint Workshop on Updating Digital Data by Photogrammetric Methods* (Hal. 193-200).
- Whittaker, Barry N., dan David J. Reddish. 1989. *Subsidence: Occurrence, Prediction, and Control. Developments in Geotechnical Engineering* 56. New York : Elsevier
- Wolf, Paul R, dkk. 1993. *Elemen fotogrametri: Dengan Interpretasi Foto Udara Dan Penginderaan Jauh*. Jakarta: Gadjah Mada University Press.