



TUGAS AKHIR - RG141536

**ORTOREKTIFIKASI FOTO FORMAT KECIL
UNTUK PERHITUNGAN DEFORMASI
JEMBATAN (Studi Kasus : Jembatan
Suramadu, Surabaya - Madura)**

**SHOFIYATUL QOYIMAH
NRP 3511 100 014**

**Dosen Pembimbing
Hepi Hapsari Handayani, S.T, M.Sc**

**JURUSAN TEKNIK GEOMATIKA
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



FINAL ASSIGNMENT - RG141536

**SMALL FORMAT PHOTO
ORTHORECTIFICATION FOR CALCULATING
BRIDGE DEFORMATION (Case Study :
Suramadu Bridge, Surabaya - Madura)**

**SHOFIYATUL QOYIMAH
NRP 3511 100 014**

**Supervisor
Hepi Hapsari Handayani, S.T, M.Sc**

**DEPARTMENT OF GEOMATICS ENGINEERING
Faculty of Civil Engineering and Planning
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**ORTOREKTIFIKASI FOTO FORMAT KECIL UNTUK
PERHITUNGAN DEFORMASI JEMBRAN (Studi Kasus :
Jembatan Suramadu, Surabaya – Madura)**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

**Program Studi S-1 Teknik Geomatika
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

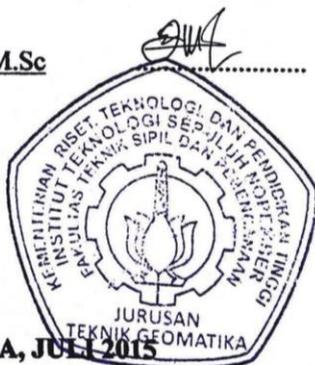
Oleh :

SHOFIYATUL QOYIMAH

NRP. 3511 100 014

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

1. Hepi Hapsari Handayani, S.T, M.Sc
NIP. 1978 1212 2005 01 2001



“Halaman ini sengaja diosongkan”

**ORTOREKTIFIKASI FOTO FORMAT KECIL UNTUK
PERHITUNGAN DEFORMASI JEMBATAN
(Studi Kasus : Jembatan Suramadu, Surabaya – Madura)**

Nama Mahasiswa : Shofiyatul Qoyimah
NRP : 3511 100 014
Jurusan : Teknik Geomatika FTSP – ITS
Dosen Pembimbing : Hepsari Handayani, S.T, M.Sc

Abstrak

Jembatan Suramadu merupakan jembatan terpanjang di Indonesia yang melintasi Selat Madura untuk menghubungkan Pulau Jawa (di Kota Surabaya) dan Pulau Madura (di Bangkalan), Indonesia. Jembatan terkadang sering mengalami deformasi sehingga dibutuhkan pengamatan deformasi yang bertujuan untuk memberikan informasi geometrik dari benda terdeformasi.

Fotogrametri jarak dekat digunakan untuk pengamatan deformasi karena kelebihanannya dalam hal efisiensi biaya serta ukuran dan jangkauan objek yang diamati. Proses kalibrasi kamera dan ortorektifikasi dilakukan untuk mereduksi pergeseran film akibat ketidakstabilan parameter orientasi dalam dan parameter orientasi luar pada kamera digital non metrik format kecil. Metode ortorektifikasi merupakan proses pembuatan foto tegak untuk mengurangi berbagai distorsi akibat kemiringan kamera/sensor dan pergeseran relief berdasarkan persamaan kolinearitas.

Hasil dari proses ortorektifikasi berupa mosaik ortofoto dengan sistem koordinat 2 dimensi dan DEM yang dipengaruhi oleh pendefinisian sistem koordinat saat pemotretan dan saat proses ortorektifikasi. Pengamatan deformasi menggunakan proses ortorektifikasi di sisi Gresik jembatan Suramadu pada tanggal 19 Maret 2015 dan 7 Mei 2015 menunjukkan bahwa di bentang 1 (antara *Abutment* Surabaya dan pilar 1), deformasi pada sumbu XY berkisar antara 1 – 16 mm dan pada sumbu Z berkisar antara 0 – 35 mm. Dan di bentang 100 (antara pilar 99 dan 100),

deformasi pada sumbu XY berkisar antara 11 – 55 mm dan pada sumbu Z berkisar antara 6 – 37 mm.

Uji validasi koordinat mosaik ortofoto terhadap koordinat pengukuran terestris menunjukkan bahwa koordinat mosaik ortofoto di arah Surabaya tidak memiliki nilai yang signifikan sedangkan di arah Madura memiliki nilai yang signifikan terhadap koordinat hasil pengukuran terestris. Sedangkan prosentase rerata jumlah total titik diterimanya hipotesa nol pada pengukuran 19 Maret 2015 di arah Surabaya sebesar 60.42% dan di arah Madura sebesar 27.08%.

Terdapat beberapa saran untuk penelitian berikutnya. Pertama, melakukan pengamatan lebih dari 2 kala. Kedua, menggunakan GCP yang memiliki tanda silang. Ketiga, melakukan proses kalibrasi *bundle adjustment self calibration* dengan menggunakan titik kontrol pada jembatan dan keempat adalah melakukan percobaan lebih dari 1 kali dalam proses ortorektifikasi.

Kata Kunci : Deformasi, Jembatan Suramadu, Kamera Dijital Non Metrik Format Kecil, Ortorektifikasi

**SMALL FORMAT PHOTO ORTHORECTIFICATION
FOR CALCULATING BRIDGE DEFORMATION
(Case Study : Suramadu Bridge, Surabaya – Madura)**

Student Name : Shofiyatul Qoyimah
Reg. Number : 3511 100 014
Department : Teknik Geomatika FTSP – ITS
Supervisor : Hepi Hapsari Handayani, S.T, M.Sc

Abstract

Suramadu Bridge is the longest bridge in Indonesia that crosses Madura Strait and connecting Java Island (at Surabaya City) and Madura Island (at Bangkalan), Indonesia. Sometimes, a bridge structure has deformation so that needed to have a monitoring periodically to find out the geometric information of the deformed object.

Close range photogrammetry is used in deformation monitoring because of its advantages including cost saving, objects dimension and range of the measurement. Camera calibration and orthorectification are useful to decrease the film movement because of interior and exterior orientation parameter are instability in small format non metric digital camera. Orthorectification method is a process for building orthophoto to reduce some distortions caused by rotating camera and relief displacement based on collinearity.

Orthophoto mosaic is a result of orthorectification process, which has 2 dimension coordinate system and DEM value suffered by coordinate system determination while capturing and orthorectifying photos. Deformation monitoring using orthorectification at Gresik side of Suramadu bridge on March, 19th 2015 and on May, 7th 2015 shows that at the first tight (between Surabaya Abutment and first pier), any deformations have a range of 1 – 16 mm in the XY axis and 0 – 35 mm in the Z axis. At 100th

tight (between 99th pier and 100th pier), deformations have a range of 11 – 55 mm in the XY axis and 6 – 37 mm in the Z axis.

Test of validation for orthophoto mosaic coordinates showed that orthophoto coordinates in Surabaya side do not have a significant value to the terrestrial measuring coordinates. But at Madura, orthophoto coordinates has significant value to the terrestrial measuring coordinates. Whereas the percentage of the total number of points receives the null hypothesis on March, 19th 2015 at Surabaya is 60.42% and at Madura is 27.08%.

There are some advices for the next research. First, do monitoring process more than 2 times. Second, use GCP that have a cross marker. Third, do bundle adjustment self calibration using control point on the bridge and try orthorectification process more than 1 times.

Keywords : Deformation, Orthorectification, Small Format Non Metric Digital Camera, Suramadu Bridge

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirobbil'alamin, puja dan puji syukur saya haturkan kehadiran Tuhan Yang maha Esa, karena atas segala rahmat serta anugerah-Nya tugas akhir dengan judul “Ortorektifikasi Foto Format Kecil untuk Perhitungan Deformasi Jembatan, Studi Kasus : Jembatan Suramadu, Surabaya – Madura)” ini dapat diselesaikan dengan lancar tanpa adanya halangan yang berarti.

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam memperoleh derajat kesarjanaan Strata – 1 pada Jurusan Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Penyusun mengucapkan terima kasih yang sebesar – besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini. Ucapan tersebut ditujukan kepada :

1. Bapak dan ibu penulis yang telah memberikan dukungan dan do'a restu.
2. Bapak Dr. Ir. Muhammad Taufik selaku Ketua Jurusan Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
3. Ibu Heki Hapsari Handayani, S.T, M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah banyak meluangkan waktu untuk membantu pelaksanaan penelitian ini.
4. Ibu Aderiani, S.T, M.T selaku Kepala Unit Pengelola Sistem Monitoring Keandalan Struktur Jembatan Suramadu atas semua kritik dan saran yang diberikan atas penelitian ini.
5. Semua dosen di Jurusan Teknik Geomatika yang telah meluangkan waktu untuk memberikan saran dan masukan dalam pelaksanaan penelitian ini.
6. Laboran Jurusan Teknik Geomatika yang telah memfasilitasi dan mendampingi pengukuran dalam penelitian ini.

7. Semua civitas akademik Jurusan Teknik Geomatika dan pihak – pihak yang tidak mungkin dapat saya sebutan satu per satu, yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. Seluruh rekan Jurusan Teknik Geomatika yang telah banyak membantu menyelesaikan penelitian Tugas Akhir ini.

Tugas akhir ini tentulah masih memiliki banyak kekurangan, maka penulis mengharapkan masukan dan saran demi perbaikan tugas iakhir ini di masa yang akan datang. Akhir kata, semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca pada umumnya dan mahasiswa Jurusan Teknik Geomatika pada khususnya.

Surabaya, Juli 2015

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
ABSTRAK.....	v
HALAMAN PENGESAHAN.....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
DAFTAR LAMPIRAN.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Rumusan Permasalahan.....	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Fotogrametri Jarak Dekat.....	7
2.1.1 Prinsip Dasar Fotogrametri Jarak Dekat.....	7
2.1.2 Reseksi Spasial (<i>Space Resection</i>).....	9
2.1.3 Interseksi Spasial (<i>Intersection</i>).....	11
2.2 Sistem Koordinat dalam Fotogrametri.....	12
2.2.1 Sistem Koordinat Foto.....	12
2.2.2 Sistem Koordinat Piksel.....	12
2.2.3 Sistem Koordinat Kamera.....	13
2.2.4 Sistem Koordinat Objek.....	13
2.3 Uji Statistik.....	14
2.4 Kamera.....	16
2.5 Kalibrasi Kamera.....	19
2.6 Pemantauan Deformasi Menggunakan Teknik Fotogrametri Jarak Dekat.....	23
2.7 Foto Udara Format Kecil.....	26
2.8 Ortorektifikasi.....	27
2.9 Tinggi Titik di Permukaan Bumi.....	29

2.10 Jembatan.....	30
2.11 Jembatan Suramadu.....	32
2.12 Resensi Penelitian Terdahulu	34
BAB III METODOLOGI	
3.1 Lokasi Penelitian	37
3.2 Data dan Peralatan.....	38
3.2.1 Data	38
3.2.2 Peralatan.....	38
3.3 Metodologi Penelitian	40
3.3.1 Tahap Persiapan	40
3.3.2 Tahap Pengolahan Data.....	41
3.3.3 Tahap Analisis.....	46
3.3.4 Tahap Akhir	46
BAB IV HASIL DAN ANALISA	
4.1 Hasil Tahapan Kalibrasi Kamera	47
4.1.1 Hasil Pengukuran GCP Bidang Kalibrasi	47
4.1.2 Hasil Pemotretan Bidang Kalibrasi	48
4.1.3 Hasil Dijitasi Titik GCP Bidang Kalibrasi	50
4.1.4 Hasil Transformasi Koordinat GCP dari Sistem Koordinat Piksel ke Sistem Koordinat Foto (mm)	51
4.1.5 Hasil Proses Reseksi Spasial	52
4.1.6 Hasil Proses <i>Bundle Adjustment Self Calibration</i>	53
4.1.7 Analisa Stabilitas Kamera	53
4.2 Hasil Tahapan Pengolahan Data Foto dan GCP.....	59
4.2.1 Hasil Pengukuran Koordinat GCP Menggunakan <i>Total Station</i>	59
4.2.2 Hasil Proses Pemotretan Bangunan Jembatan Suramadu.....	62
4.2.3 Hasil Proses Perhitungan Parameter Orientasi Luar Foto Objek Jembatan Suramadu.....	63
4.2.4 Hasil Proses Ortorektifikasi	64
4.2.5 Analisa Visual Mosaik Ortofoto	67
4.2.6 <i>RMS Error</i> GCP pada Ortofoto	72
4.2.7 Koordinat Objek untuk Penentuan Deformasi	73

4.2.8 Hasil Proses Perhitungan Vektor Pergeseran	75
4.2.9 Analisa Deteksi Deformasi Objek.....	78
4.2.10 Hasil dan Analisa Proses Uji Statistik Validasi Koordinat Mosaik Ortofoto	80
BAB V PENUTUP	
5.1 Kesimpulan.....	91
5.2 Saran.....	92
DAFTAR PUSTAKA.....	93
LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Data Spesifikasi Kamera Nikon D3000	39
Tabel 4.1	Koordinat GCP pada Bidang Kalibrasi dalam Sistem Koordinat Tanah (Satuan mm).....	47
Tabel 4.2	Koordinat GCP Bidang Kalibrasi (Satuan Piksel) pada Foto 1 dalam Sistem Koordinat Piksel.....	50
Tabel 4.3	Titik GCP Foto 1 dalam Sistem Koordinat Foto (Satuan mm) Hasil Transformasi Koordinat.....	51
Tabel 4.4	Parameter Orientasi Luar Foto 1	52
Tabel 4.5	Parameter Orientasi Dalam 9 Foto	53
Tabel 4.6	Nilai Reprojection Error Foto 1 (Satuan mm).....	55
Tabel 4.7	Nilai Kesalahan Radial Foto 1 (Satuan mm)	57
Tabel 4.8	Nilai RMS error 9 Foto (Satuan mm).....	59
Tabel 4.9	Koordinat Titik Bench Mark dalam Sistem Koordinat UTM (Satuan meter).....	60
Tabel 4.10	Koordinat GCP dari Arah Surabaya pada Pengukuran Tanggal 19 Maret 2015 dalam Sistem Koordinat UTM (Satuan meter).....	61
Tabel 4.11	Parameter Orientasi Luar Foto Bentang 1 (arah Surabaya) pada Pemotretan 19 Maret 2015.....	64
Tabel 4.12	Nilai RMSE GCP Ortofoto (Satuan Piksel)	73
Tabel 4.13	Koordinat GCP Objek Deformasi Arah Surabaya dalam Sistem Koordinat UTM Pengukuran 19 Maret 2015.....	75
Tabel 4.14	Besar Deformasi Jembatan Arah Surabaya Secara Horizontal dan Vertikal dalam Sistem Koordinat UTM Satuan Meter.....	76
Tabel 4.15	Besar Deformasi Jembatan Arah Madura Secara Horizontal dan Vertikal dalam Sistem Koordinat UTM Satuan Meter.....	76
Tabel 4.16	Besar Vektor Pergeseran GCP Jembatan Arah Surabaya dan Madura dalam Satuan Meter.....	79

Tabel 4.17 Besar Selisih Koordinat GCP Hasil Pengukuran Total Station Kala 1 dan Kala 2 Arah Surabaya Sistem Koordinat UTM dalam Satuan.....	82
Tabel 4.18 Besar Selisih Koordinat GCP Hasil Pengukuran Total Station Kala 1 dan Kala 2 Arah Madura Sistem Koordinat UTM dalam Satuan Meter.....	83
Tabel 4.19 Hasil Uji t- student Koordinat Easting Arah Surabaya dalam Satuan Meter.....	86

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kondisi kesegarisan (Colinearity Condition)	8
Gambar 2.2 Interseksi spasial.....	12
Gambar 2.3 Sistem Koordinat Foto dan Sistem Koordinat Piksel.....	13
Gambar 2.4 Sistem Koordinat Kamera dan Sistem Koordinat Objek.....	14
Gambar 2.5 Tipe Kalibrasi Kamera	23
Gambar 2.6 Prinsip Dasar Proses Deformasi	24
Gambar 2.7 Ilustrasi vektor pergeseran.....	25
Gambar 2.8 Tinggi terhadap bidang referensi	29
Gambar 2.9 Jembatan Suramadu	34
Gambar 3.1 Lokasi Penelitian.....	37
Gambar 3.2 Jembatan Suramadu	37
Gambar 3.3 Letak Titik Kontrol pada Bentang Jembatan Suramadu (a) Arah Surabaya (b) Arah Madura	38
Gambar 3.4 Diagram Alir Tahapan Penelitian	40
Gambar 3.5 Diagram Alir Tahapan Kalibrasi Kamera.....	42
Gambar 3.6 Diagram Alir Tahap Pengolahan Data Foto dan GCP	44
Gambar 4.1 Bidang Kalibrasi Kamera beserta Lokasi 20 GCP...47	
Gambar 4.2 Bidang Kalibrasi Papan Catur Beserta Gambaran Posisi Pemotretan (Kotak Merah).....	49
Gambar 4.3 Foto Bidang Kalibrasi yang Diambil dari 9 Posisi Kamera yang Berbeda.....	49
Gambar 4.4 Visualisai Kesalahan Koordinat Foto Awal dan Koordinat Foto Terkoreksi.....	56
Gambar 4.5 Hasil Pemotretan Bangunan Jembatan Suramadu pada Tanggal 19 Maret 2015 Arah Surabaya.....	62
Gambar 4.6 Hasil Pemotretan Bangunan Jembatan Suramadu pada Tanggal 19 Maret 2015 Arah Madura	62
Gambar 4.7 Hasil Pemotretan Bangunan Jembatan Suramadu pada Tanggal 7 Mei 2015 Arah Surabaya.....	63

Gambar 4.8 Hasil Pemotretan Bangunan Jembatan Suramadu pada Tanggal 7 Mei 2015 Arah Madura	63
Gambar 4.9 Foto Jembatan Suramadu Sisi Gresik dari Arah Surabaya (a) Ortofoto 2 Dimensi dan (b) Foto Bernilai DEM.....	66
Gambar 4.10 Foto Jembatan Suramadu Sisi Gresik dari Arah Madura (a) Ortofoto 2 Dimensi dan (b) Foto Bernilai DEM.....	67

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Spesifikasi Kamera
- Lampiran 2 Tabel Koordinat GCP Bidang Kalibrasi 9 Foto
- Lampiran 3 Tabel Titik GCP 9 Foto dalam Sistem Koordinat Foto (Satuan mm) Hasil Transformasi Koordinat
- Lampiran 4 Tabel Parameter Orientasi Luar 9 Foto
- Lampiran 5 Tabel Nilai Selisih Parameter Orientasi Dalam 9 Foto Setiap Iterasi
- Lampiran 6 Tabel Nilai Reprojection Error 9 Foto (Satuan mm)
- Lampiran 7 Visualisasi Kesalahan Koordinat Foto Awal dan Koordinat Terkoreksi
- Lampiran 8 Tabel Nilai Kesalahan Radial 9 Foto (Satuan mm)
- Lampiran 9 Tabel Koordinat GCP dalam Sistem Koordinat UTM (Satuan meter)
- Lampiran 10 Tabel Parameter Orientasi Luar Foto Bentang dan Arah
- Lampiran 11 Tabel Koordinat GCP Objek Deformasi dalam Sistem Koordinat UTM
- Lampiran 12 Visualisasi Arah Vektor Pergeseran Jembatan 2 Dimensi
- Lampiran 13 Gambar Vektor Deformasi 3 Dimensi
- Lampiran 14 Tabel Hasil Uji *t- student* Koordinat dalam Satuan Meter

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Jembatan adalah suatu konstruksi yang dibangun baik di atas permukaan air dan/atau di atas permukaan tanah untuk melewati suatu massa atas suatu penghalang atau rintangan seperti sungai, rel kereta api ataupun jalan raya. Jembatan Suramadu merupakan jembatan terpanjang di Indonesia dengan panjang 5.438 m yang melintasi Selat Madura untuk menghubungkan Pulau Jawa (di Kota Surabaya) dan Pulau Madura (di Bangkalan), Indonesia. Jembatan yang mulai dibuka untuk umum pada tanggal 10 Juni 2009 ini ditujukan untuk mempercepat pembangunan di Pulau Madura, meliputi bidang infrastruktur dan ekonomi di Madura. Bahkan, dengan dibangunnya jembatan ini akan membuka peluang bagi Kabupaten Bangkalan untuk berkembang menjadi daerah lokasi kegiatan perindustrian di Jawa Timur (Badan Pengembangan Wilayah Surabaya Madura, 2011).

Jembatan sebagai sarana penghubung antar daerah yang dilewati oleh benda mati maupun benda hidup, terkadang sering mengalami perubahan bentuk, posisi dan dimensi dari kondisi semula. Hal inilah yang disebut sebagai deformasi. Pengamatan deformasi bertujuan untuk memberikan informasi geometrik dari benda terdeformasi yakni perubahan posisi, bentuk dan dimensinya guna keperluan analisa. Analisa deformasi dilakukan dengan tujuan untuk menentukan besarnya pergeseran posisi dan parameter - parameter deformasi. Dalam kurun waktu 9 April 2014 – 7 Juni 2014 dengan menggunakan metode fotogrametri jarak dekat, Jembatan Suramadu pada bentang 102 (antara pilar 102 dan *Abutment* Madura) mengalami pergeseran posisi maksimal ke arah sumbu X dan Y dalam

sistem koordinat UTM sebesar 79 mm dan ke arah sumbu Z sebesar 9 mm (Elviani, 2014).

Pengamatan deformasi banyak dilakukan menggunakan sipat datar (Nirwana, 2003), *Global Positioning System* (GPS) (Andreas, 2001), *Interferometry Synthetic Aperture Radar* (INSAR) (Emilio, 2005), *Photogrammetry* (Jiang, 2005) serta gabungan dari dua atau lebih metode tersebut (Kusnandar, 2004). Metode fotogrametri jarak dekat sebagai bagian dari fotogrametri memiliki kelebihan dalam efisiensi teknik pengukuran tiga dimensi yang memiliki potensial presisi tinggi dengan biaya yang terjangkau (Hampel, 2006). Kelebihan dari teknik fotogrametri jarak dekat terutama jika obyek yang akan diukur sulit untuk dijangkau dan atau memiliki dimensi kecil (Atkinson, 1980). Teknik fotogrametri jarak dekat juga dapat dilakukan untuk mengukur cakupan keseluruhan maupun sebagian dari suatu obyek yang diteliti dengan uji coba metodenya yang cepat dan ekonomis (Jiang, 2005).

Kamera non metrik adalah kamera yang secara spesifik tidak didesain untuk tujuan fotogrametri (Karara, 1989). Kamera non metrik telah banyak digunakan dalam aplikasi fotogrametri jarak dekat dan telah membuat dampak besar akan kebutuhan pengukuran fotogrametri jarak dekat. Kamera non metrik dengan format lensa kurang dari 80 cm x 80 cm disebut dengan kamera format kecil (Ahmad, 1994). Foto digital format kecil menawarkan pemecahan masalah mahalnnya sistem foto udara konvensional. Sistem kamera yang biasa digunakan dalam foto format kecil adalah kamera *handheld single lens reflect* (SLR) yang biasa digunakan dalam fotografi estetik dengan format film 36 mm x 24 mm. Kelebihan foto format kecil, selain berat kameranya yang ringan, jarak pemotretan dapat disesuaikan dan kelebihan dalam pengolahan, penyimpanan serta analisis secara digital (Atkinson, 1980). Kekurangan teknologi foto digital format kecil adalah distorsi lensa yang tinggi, tidakstabilnya

parameter orientasi dalam dan tidak adanya penentuan parameter orientasi luar saat pemotretan (Georgopoulos, 1992).

Dikarenakan obyek yang akan diamati memiliki dimensi yang tidak terlalu besar dan berdasar kelebihan - kelebihan teknik fotogrametri jarak dekat dan teknologi kamera digital non metrik format kecil seperti di atas, maka penelitian Ortorektifikasi Foto Format Kecil untuk Perhitungan Deformasi Jembatan ini mencoba menggunakan metode alternatif yakni dengan teknik Fotogrametri Jarak Dekat dengan memanfaatkan teknologi kamera digital non-metrik format kecil. Cara kerja metode ini dalam pemantauan deformasi pada prinsipnya sama dengan teknik GPS yaitu mengamati perubahan koordinat titik obyek dalam waktu pengukuran yang berbeda.

Kamera format kecil mengalami ketidakstabilan pada parameter orientasi dalam dan parameter orientasi luar serta geometriaknya. Ketidakstabilan orientasi dalam, distorsi lensa, pergeseran film dapat direduksi dengan kombinasi proses kalibrasi dan evaluasi berdasarkan pemodelan matematis (Ahmad, 1994). Dalam penelitian Ortorektifikasi Foto Format Kecil untuk Perhitungan Deformasi Jembatan ini, akan dilakukan kombinasi proses kalibrasi kamera dan ortorektifikasi untuk mereduksi adanya ketidakstabilan lensa kamera. Ortorektifikasi adalah proses pembuatan foto sendeng/miring ke foto/*image* yang ekuivalen dengan foto tegak. Foto tegak ekuivalen yang dihasilkan disebut foto terektifikasi. Ortorektifikasi pada dasarnya merupakan proses manipulasi citra untuk mengurangi/menghilangkan berbagai distorsi yang disebabkan oleh kemiringan kamera/sensor dan pergeseran relief. Model matematis yang digunakan pada ortorektifikasi adalah persamaan kolinearitas (Yang, 2000).

Aspek penting yang perlu diperhatikan dalam penerapan teknik Fotogrametri Jarak Dekat setidaknya

menyangkut target yang digunakan, kamera yang digunakan, kalibrasi kamera, jenis pengukuran, sebaran titik kontrol, jaring pengukuran, letak stasiun kamera, banyaknya foto, dan perangkat lunak yang digunakan.

Fotogrametri Jarak Dekat memiliki potensi yang besar untuk memberikan cara yang efektif dan efisien untuk mengukur deformasi Jembatan Suramadu. Jika dalam penelitian Analisa Deformasi Jembatan Suramadu dengan Teknik Fotogrametri Rentang Dekat yang dilakukan oleh Lia Eka Elviani titik berat obyek hanya pada ujung Jembatan Suramadu dari arah Madura dengan proses reseksi dan interseksi spasial, maka pada penelitian Ortorektifikasi Foto Format Kecil untuk Perhitungan Deformasi Jembatan akan dititikberatkan pada ujung Jembatan Suramadu dari arah Surabaya dan dari arah Madura dengan cara pengolahan ortorektifikasi pada foto guna mengetahui nilai deformasi yang terjadi.

1.2 **Rumusan Permasalahan**

Perumusan masalah yang dimunculkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Bagaimana proses pembuatan ortofoto Jembatan Suramadu ?
- b. Berapa besar nilai deformasi hasil dari proses ortorektifikasi yang terjadi pada Jembatan Suramadu di bentang 1 (antara *Abutment* Surabaya dan pilar 1) dan di bentang 100 (antara pilar 99 dan 100) ?
- c. Bagaimana analisa ketelitian hasil proses ortorektifikasi berdasarkan uji statistik?

1.3 **Batasan Masalah**

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Penelitian ini akan menggunakan metode Fotogrametri Jarak Dekat.

- b. Teknologi yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah kamera digital non metrik format kecil dengan resolusi 10 megapiksel.
- c. Pemantauan deformasi Jembatan Suramadu akan dilakukan pada sisi Gresik jembatan di bentang 1 (antara *Abutment* Surabaya dan pilar 1) dan di bentang 100 (antara pilar 99 dan 100) mengacu pada posisi di permukaan tanah dengan pengolahan data foto jembatan menggunakan teknik ortorektifikasi.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Melakukan proses ortorektifikasi foto sisi Gresik Jembatan Suramadu di bentang 1 (antara *Abutment* Surabaya dan pilar 1) dan di bentang 100 (antara pilar 99 dan 100).
- b. Mengetahui besar nilai deformasi berdasarkan hasil proses ortorektifikasi yang terjadi pada Jembatan Suramadu sisi Gresik di bentang 1 (antara *Abutment* Surabaya dan pilar 1) dan di bentang 100 (antara pilar 99 dan 100).
- c. Menganalisa ketelitian hasil proses ortorektifikasi berdasarkan uji statistik.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang ingin diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Data dan hasil penelitian dapat memberikan pengetahuan mengenai penggunaan metode ortorektifikasi foto dalam pemantauan deformasi suatu jembatan.
- b. Informasi mengenai deformasi pada Jembatan Suramadu dapat digunakan dalam pemantauan dan pengawasan Jembatan Suramadu di masa yang akan datang.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

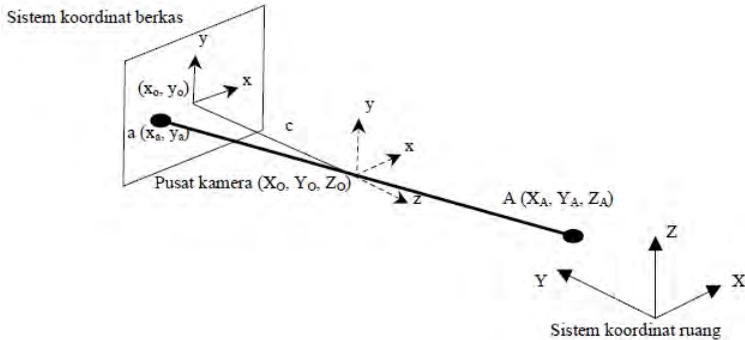
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Fotogrametri Jarak Dekat

Fotogrametri adalah seni, ilmu, dan teknologi untuk memperoleh informasi terpercaya tentang objek fisik dan lingkungan melalui proses perekaman, pengukuran, dan interpretasi gambaran fotografis dan pola radiasi tenaga elektromagnetik yang terekam (Wolf, 1983). Metode fotogrametri merupakan suatu metode pengukuran terhadap suatu objek yang dilakukan tanpa perlu bersentuhan langsung dengan objek yang diukur. Pengukuran terhadap objek dilakukan pada data yang diperoleh dengan perekaman citra pada suatu sensor yang digunakan.

2.1.1 Prinsip Dasar Fotogrametri Jarak Dekat

Pada saat sebuah foto diambil, berkas sinar dari objek akan menjalar menyerupai garis lurus menuju pusat lensa kamera hingga mencapai bidang film. Kondisi dimana titik objek pada dunia nyata, titik pusat proyeksi, dan titik obyek pada bidang foto terletak satu garis dalam ruang dinamakan kondisi kesegarisan berkas sinar atau kondisi kolinearitas (*collinearity condition*). Kondisi ini merupakan syarat fundamental dalam fotogrametri (Atkinson, 1996).



Gambar 2.1 Kondisi kesegarisian (Colinearity Condition)

Sumber : Atkinson, 1996

Dalam fotogrametri, posisi dari sebuah objek pada ruang didefinisikan pada sistem koordinat kartesian 3D. Pada awalnya, objek terdefinisi pada sistem koordinat berkas. Kemudian dilakukan transformasi koordinat untuk mendapatkan koordinat objek pada sistem koordinat tanah. Antara kedua sistem koordinat itu terdapat perbedaan orientasi dan skala sehingga, transformasi koordinat terdiri dari translasi, rotasi dan perubahan skala.

Pusat dari sistem koordinat berkas merupakan pusat dari lensa kamera, yang dikenal dengan nama pusat perspektif (*perspective center*). Titik pusat lensa kamera diketahui, sehingga berkas sinar dari objek yang melewati pusat lensa kamera akan jatuh pada sebuah titik pada bidang foto yang dapat diketahui koordinat fotonya. Perhatikan Gambar 2.1., X_o , Y_o , Z_o merupakan titik pusat kamera, x_a , y_a , $-c$ merupakan koordinat sebuah titik A pada sistem koordinat berkas, dan X_A , Y_A , Z_A merupakan koordinat titik A pada sistem koordinat

tanah, maka persamaan kolineraritas adalah (Atkinson, 1996):

$$\begin{aligned} x_a &= -c \frac{[r_{11}(X_o - X_A) + r_{12}(Y_o - Y_A) + r_{13}(Z_o - Z_A)]}{[r_{31}(X_o - X_A) + r_{32}(Y_o - Y_A) + r_{33}(Z_o - Z_A)]} \\ y_a &= -c \frac{[r_{21}(X_o - X_A) + r_{22}(Y_o - Y_A) + r_{23}(Z_o - Z_A)]}{[r_{31}(X_o - X_A) + r_{32}(Y_o - Y_A) + r_{33}(Z_o - Z_A)]} \end{aligned} \quad (2.1)$$

dengan c merupakan *principal distance*, dan r_{ij} merupakan elemen dari matriks rotasi. Rumus di atas merupakan rumus kolineritas dengan elemen dan matriks rotasi diberikan pada persamaan berikut:

$$\begin{aligned} R &= R_\omega R_\varphi R_\kappa \\ &= \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa & -\cos \omega \sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa \\ -\cos \varphi \sin \kappa & -\sin \omega \sin \varphi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa & \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cos \varphi & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.2)$$

R_κ merupakan rotasi terhadap sumbu z , R_ω adalah rotasi terhadap sumbu x , sedangkan R_φ rotasi terhadap sumbu y . Rumus di atas membutuhkan nilai – nilai yang didapat dari proses reseksi spasial.

2.1.2 Reseksi Spasial (*Space Resection*)

Space Resection atau reseksi spasial dengan kolineritas merupakan metode numerik murni yang secara serentak menghasilkan enam unsur orientasi luar (EOP). Biasanya nilai sudut X_L , Y_L , Z_L , ω , φ , κ diperoleh dengan penyelesaian itu. *Space Resection* dengan kolineritas memungkinkan penggunaan ulang sejumlah titik kontrol medan. Oleh karena itu dapat digunakan cara perhitungan kuadrat terkecil untuk menentukan nilai yang paling mungkin bagi

keenam unsur itu. Meskipun perhitungannya panjang dapat dilakukan secara rutin. *Space Resection* dengan kolinieritas merupakan metode yang lebih disukai untuk menentukan orientasi luar (Wolf, 2000).

Space Resection merupakan suatu proses untuk menentukan elemen *Exterior Orientation Parameter* dan posisi sensor dari titik kontrol tanah dan koordinat *image*. Metode perhitungan yang paling biasa digunakan adalah persamaan kolinieritas, dimana prinsip dari persamaan tersebut adalah titik kontrol, titik pada *image*, dan proyeksi pusat terletak pada satu garis lurus. Untuk setiap titik kontrol, dapat diperoleh dua persamaan. Karena terdapat 6 parameter *Exterior Orientation*, sedikitnya tiga titik kontrol dibutuhkan untuk memecahkan masalah *resection*. Metode perhitungan dengan menggunakan teknik *Least Square* akan diterapkan pada penelitian ini untuk menentukan nilai yang paling mungkin pada enam parameter *Exterior Orientation*.

Dalam penyelesaian secara *least square* maka diperoleh persamaan untuk proses *resection* dalam bentuk persamaan kolinieritas terlinierisasi yang disederhanakan termasuk untuk nilai residualnya sebagai berikut (Wolf, 2000):

$$\begin{aligned} b_{11}d\omega + b_{12}d\phi + b_{13}dk - b_{14}dX_L - b_{15}dY_L - b_{16}dZ_L &= J + vx_a \\ b_{21}d\omega + b_{22}d\phi + b_{23}dk - b_{24}dX_L - b_{25}dY_L - b_{26}dZ_L &= K + vy_a \end{aligned} \quad (2.3)$$

dX_L , dY_L , dZ_L , $d\omega$, $d\phi$ adalah parameter unsur orientasi luar yang didapat dari proses reseksi spasial, b adalah turunan dari parameter, J dan K adalah nilai pendekatan dan v adalah residu dimana

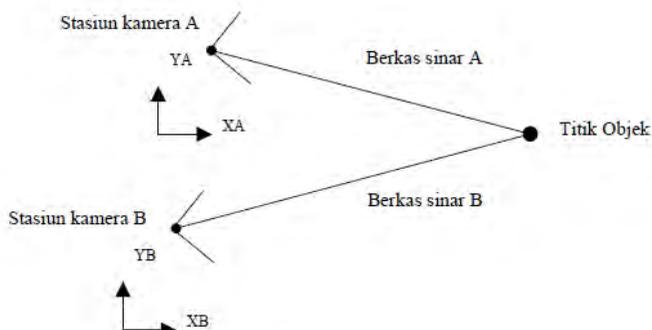
setiap notasi di atas diwakili oleh susunan matriks sebagai berikut :

$$A = \begin{bmatrix} b_{11a} & b_{12a} & b_{13a} & -b_{14a} & -b_{15a} & -b_{16a} \\ b_{21a} & b_{22a} & b_{23a} & -b_{24a} & -b_{25a} & -b_{26a} \\ b_{11b} & b_{12b} & b_{13b} & -b_{14b} & -b_{15b} & -b_{16b} \\ b_{21b} & b_{22b} & b_{23b} & -b_{24b} & -b_{25b} & -b_{26b} \\ b_{11c} & b_{12c} & b_{13c} & -b_{14c} & -b_{15c} & -b_{16c} \\ b_{21c} & b_{22c} & b_{23c} & -b_{24c} & -b_{25c} & -b_{26c} \\ b_{11d} & b_{12d} & b_{13d} & -b_{14d} & -b_{15d} & -b_{16d} \\ b_{21d} & b_{22d} & b_{23d} & -b_{24d} & -b_{25d} & -b_{26d} \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} J_a \\ K_a \\ J_b \\ K_b \\ J_c \\ K_c \\ J_d \\ K_d \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} d\omega \\ d\varphi \\ d\kappa \\ dX_L \\ dY_L \\ dZ_L \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} V_{xa} \\ V_{ya} \\ V_{xb} \\ V_{yb} \\ V_{xc} \\ V_{yc} \\ V_{xd} \\ V_{yd} \end{bmatrix}$$

2.1.3 Interseksi Spasial (*Intersection*)

Untuk mendapatkan posisi objek pada dunia nyata, maka diperlukan berkas sinar objek yang sama dari foto lainnya (Leitch, 2002). Kedua berkas sinar akan berpotongan pada objek yang sama di dunia nyata. Perpotongan ini dinamakan interseksi spasial (Atkinson, 1996). Jika terdapat titik A di lapangan yang dapat diamati dari 2 foto, maka di setiap foto akan terdapat bayangan titik tersebut. Apabila diketahui posisi kamera dan arah sumbu optiknya maka perpotongan sinar garis dari foto 1 dan foto 2 akan dapat menentukan posisi koordinat titik P tersebut (Wolf, 1993). Prinsip penentuan posisi dari perpotongan sinar ini dikenal dengan interseksi spasial.



Gambar 2.2 Interseksi spasial

Sumber : Leitch, 2002

2.2 Sistem Koordinat dalam Fotogrametri

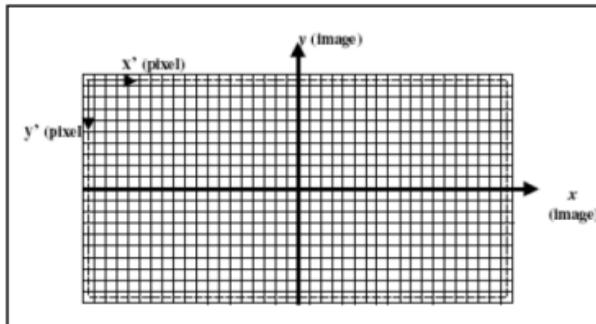
Dalam konteks fotogrametri dikenal beberapa sistem koordinat yang berhubungan dengan foto udara, yaitu sistem koordinat foto, sistem koordinat piksel, sistem koordinat kamera, dan sistem koordinat objek (Tjahjadi, 2010).

2.2.1 Sistem Koordinat Foto

Sistem koordinat foto adalah sistem koordinat dua dimensi sebuah foto dimana pada kamera non metrik maupun kamera metrik dimulai dari piksel tengah. Sumbu x positif ke arah kanan dan sumbu y positif ke arah atas (Tjahjadi, 2010).

2.2.2 Sistem Koordinat Piksel

Sistem koordinat piksel adalah sistem koordinat sebagai referensi titik terkecil pada sebuah foto, yang biasanya dinyatakan dalam satuan mm. Dimana pada kamera non metrik dimulai dari piksel kiri atas, sumbu x positif ke arah kanan (kolom), dan sumbu y positif ke arah bawah (baris) (Tjahjadi, 2010).



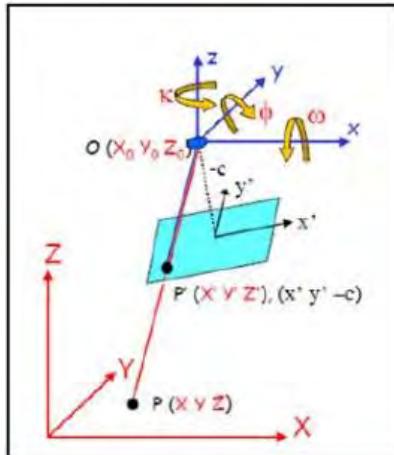
Gambar 2.3 Sistem Koordinat Foto dan Sistem Koordinat Pikel
 Sumber : Tjahjadi, 2010

2.2.3 Sistem Koordinat Kamera

Sistem koordinat kamera merupakan sistem koordinat 3D pada sebuah kamera dimana titik pusat berada pada *perspective center*. Sumbu (x,y) positif koordinat ini, sejajar dan paralel dengan sumbu (x,y) sistem koordinat objek (Tjahjadi, 2010).

2.2.4 Sistem Koordinat Objek

Sistem koordinat objek merupakan sistem koordinat 3D yang digunakan sebagai representasi bentuk dan ukuran objek melalui transformasi dari sistem koordinat foto/piksel ke sistem koordinat objek (Tjahjadi, 2010).



Gambar 2.4 Sistem Koordinat Kamera dan Sistem Koordinat Objek
Sumber : Tjahjadi, 2010

2.3 Uji Statistik

Hipotesis merupakan jawaban sementara yang hendak diuji kebenarannya. Tidak semua penelitian memerlukan hipotesis, penelitian yang bersifat eksploratif dan deskriptif tidak memerlukan hipotesis. Pengujian hipotesis dengan distribusi t adalah pengujian hipotesis yang menggunakan distribusi t sebagai uji statistik. Tabel pengujiannya disebut tabel t-student. Distribusi t pertama kali diterbitkan pada tahun 1908 dalam satu makalah oleh W.S Gosset. Uji statistik ini kemudian dibandingkan dengan nilai yang ada pada tabel untuk kemudian menerima atau menolak hipotesis nol (H_0) yang dikemukakan (Sugiyono, 2006).

Pengujian sampel dalam distribusi t dibedakan menjadi 2 jenis hipotesa, yaitu :

- a. Satu Rata – Rata

$$t_o = \frac{x - \mu}{s / \sqrt{n}} \quad (2.4)$$

rumus diatas adalah untuk menghitung nilai t dengan t_o adalah nilai t yang dihitung, x adalah rata-rata sampel, μ adalah rata-rata populasi, s adalah standar deviasi dan n adalah jumlah sampel.

Penyusunan hipotesanya adalah :

- i. $H_o : \mu_1 = \mu_2$
 $H_a : \mu_1 \neq \mu_2$
- ii. $H_o : \mu_1 \leq \mu_2$
 $H_a : \mu_1 > \mu_2$
- iii. $H_o : \mu_1 \geq \mu_2$
 $H_a : \mu_1 < \mu_2$

Apabila data yang diambil dari hasil eksperimen, maka langkah yang harus dilakukan sebelum mencari t hitung adalah :

- i. Menentukan rata-ratanya terlebih dahulu :

$$x_i = \frac{\sum x}{n} \quad (2.5)$$

Rumus di atas adalah untuk mencari nilai rata-rata dari suatu sampel. Dengan x_i adalah nilai rata-rata sampel, x adalah sampel dan n adalah jumlah sampel.

- ii. Menentukan standar deviasi :

$$S^2 = \frac{\sum (x_i - x)^2}{n - 1}$$

$$S = \sqrt{S^2} \quad (2.6)$$

Rumus di atas adalah untuk mencari nilai standar deviasi dari suatu sampel. Dengan S^2 adalah simpangan baku suatu sampel, x adalah sampel, n adalah jumlah sampel dan S adalah standar deviasi.

b. Dua Rata – Rata

$$t_o = \frac{(X_1 - X_2) - d_o}{\sqrt{\left(S_1^2/n_1\right) + \left(S_2^2/n_2\right)}} \quad (2.7)$$

Rumus di atas adalah untuk mencari nilai rata-rata dua kelompok sampel dengan syarat $S_1 \neq S_2$. X adalah sampel (pertama dan kedua). d_o adalah selisih μ_1 dengan μ_2 ($\mu_1 - \mu_2$). S adalah standar deviasi dan n adalah jumlah sampel.

Penyusunan hipotesanya adalah :

- i. $H_o : \mu_1 - \mu_2 = d_o$
 $H_a : \mu_1 - \mu_2 \neq d_o$
- ii. $H_o : \mu_1 - \mu_2 \leq d_o$
 $H_a : \mu_1 - \mu_2 > d_o$
- iii. $H_o : \mu_1 - \mu_2 \geq d_o$
 $H_a : \mu_1 - \mu_2 < d_o$

2.4 Kamera

Dalam ilmu fotogrametri, dilihat dari teknik pengambilan datanya, foto dibedakan menjadi dua kategori yaitu foto udara dan foto terestrial. Pada foto terestrial, proses perekaman data (pemotretan) dilakukan di permukaan bumi. Pada metode ini, kamera dapat dipegang dengan tangan, dipasang pada kaki kamera (*tripod*), dipasang pada menara, atau alat penyangga lain yang dirancang secara khusus. Fotogrametri terestrial digunakan untuk pemetaan objek-objek khusus yang membutuhkan ketelitian detail

seperti, bangunan, daerah galian, lubang-lubang pertambangan, timbunan material, dan lain sebagainya.

Pada foto udara, proses perekaman data dilakukan di udara melalui sebuah wahana terbang seperti balon udara, pesawat miniatur dengan kendali radio, dan pesawat ringan berawak. Metode ini dikembangkan untuk memetakan daerah-daerah yang relatif sulit dijangkau dengan metode terestrial, seperti daerah bergunung-gunung, daerah berawa, hutan, dan daerah-daerah yang padat penduduk.

Dalam fotogrametri, kamera merupakan salah satu instrument paling penting, karena kamera digunakan untuk membuat foto yang merupakan alat utama dalam fotogrametri. Oleh karena itu, dapat dikatakan pula bahwa foto yang akurat (mempunyai kualitas geometri yang tinggi) diperoleh dari kamera yang teliti. Baik untuk keperluan foto udara maupun foto terestrial, kamera diklasifikasikan menjadi dua kategori umum yaitu :

a. Kamera metrik

Kamera metrik merupakan kamera yang dirancang khusus untuk keperluan fotogrametrik. Kamera metrik yang umum digunakan mempunyai ukuran format 23cm x 23 cm, kamera metrik dibuat stabil dan dikalibrasi secara menyeluruh sebelum digunakan. Nilai-nilai kalibrasi dari kamera metrik seperti panjang fokus, distorsi radial lensa, koordinat titik utama foto diketahui dan dapat digunakan untuk periode yang lama. Untuk kamera metrik berformat normal dikenal tiga sudut bukaan (*angle field of view*), yakni : (Dipokusumo, 1999)

- i. *Normal Angle* (NA), dengan panjang fokus 210 mm,
- ii. *Wide Angle* (WA), dengan panjang fokus 152 mm, dan
- iii. *Super Wide Angle* (SWA), dengan panjang fokus 88 mm.

Sebagian besar kamera metrik biasanya dirancang dengan panjang fokus tetap untuk objek tak terhingga. Jika kamera metrik diterapkan untuk foto terestrial (pemotretan pada jarak pendek) tidak dapat menghasilkan gambar yang tajam. Sehingga diperlukan modifikasi khusus pada panjang fokusnya agar diperoleh gambar yang tajam pada saat melakukan pemotretan pada jarak yang sangat pendek.

b. Kamera non metrik

Kamera non metrik dirancang untuk foto profesional maupun pemula, dimana kualitas lebih diutamakan daripada kualitas geometrinya. Kamera non metrik memiliki dua keterbatasan utama yaitu :

i. Ketidakstabilan geometrik

Masalah terbesar penggunaan kamera non metrik adalah ketidakstabilan geometrik. Kamera non metrik memiliki lensa yang tidak sempurna, sehingga foto udara yang dihasilkan dari perekaman kamera non metrik mengalami kesalahan. Kamera ini tidak memiliki tanda-tanda fidusial, namun dapat dilakukan modifikasi untuk membuat tanda fidusial. Selain itu pada kamera non metrik tidak diketahui secara pasti besarnya panjang fokus dan posisi *principal point*, sehingga pengukuran pada foto udara menjadi kurang teliti. Kamera non metrik dapat dikalibrasi dengan teknik tertentu sehingga parameter-parameter internal yang berpengaruh pada ketelitian geometrik foto dapat diketahui, dan kamera non metrik dapat digunakan untuk aplikasi fotogrametri.

ii. Ukuran film

Keterbatasan lain dalam penggunaan kamera non metrik adalah terbatasnya ukuran film. Untuk mencakup area dengan luas dan skala yang sama, penggunaan kamera format kecil 24 mm x 36 mm

membutuhkan jumlah foto lebih banyak dibandingkan jika pemotretan itu dilakukan dengan menggunakan kamera metrik format besar 23 cm x 23 cm. Selain itu seringkali dalam pemetaan metode foto udara dibutuhkan foto dengan ukuran asli yang besar, sehingga penggunaan kamera format kecil menjadi masalah.

Penggunaan foto udara metrik format besar (23 cm x 23 cm) akan mampu memberikan ketelitian yang tidak baik, akan tetapi untuk area penentuan yang relatif kecil dipandang tidak ekonomis. Pertimbangan penggunaan kamera non metrik untuk keperluan pemetaan (foto udara) adalah adanya efisiensi biaya pemetaan untuk area yang relatif kecil. Selain itu dengan semakin berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi, keterbatasan-keterbatasan penggunaan kamera format kecil dapat diatasi, sehingga kamera non metrik menjadi instrumen yang layak digunakan untuk foto udara.

2.5 Kalibrasi Kamera

Kamera non-metrik tidak mempunyai lensa yang sempurna, sehingga proses perekaman yang dilakukan akan memiliki kesalahan. Oleh karena itu perlu dilakukan pengkalibrasian kamera untuk dapat menentukan besarnya penyimpangan-penyimpangan yang terjadi. Menurut Ziemann dan El-Hakim, sebagaimana dijabarkan oleh Atkinson bahwa kalibrasi kamera memiliki tujuan sebagai berikut :

- a. Evaluasi dari kinerja lensa
- b. Evaluasi dari stabilitas lensa
- c. Penentuan parameter optik dan geometrik dari sebuah lensa
- d. Penentuan parameter optik dan geometrik dari sistem lensa kamera atau

- e. Penentuan parameter optik dan geometrik dari sistem akuisisi data citra

Kalibrasi kamera dilakukan untuk menentukan parameter internal kamera (IOP) meliputi *principal distance* (c), titik pusat fidusial foto (x_0, y_0), distorsi lensa (K_1, K_2, K_3, P_1 and P_2), serta distorsi akibat perbedaan penyekalaan dan ketidak ortogonal antara sumbu X dan Y (b_1, b_2) (Fraser, 1997).

Distorsi lensa dapat menyebabkan bergesernya titik pada foto dari posisi yang sebenarnya, sehingga memberikan ketelitian pengukuran yang tidak baik, namun tidak mempengaruhi kualitas ketajaman citra yang dihasilkan. Distorsi lensa dapat dibagi menjadi distorsi radial dan distorsi tangensial.

Menurut ASP (1980) dalam Wigrata (1986) distorsi radial adalah pergeseran linier titik foto dalam arah radial terhadap titik utama dari posisi idealnya. Distorsi lensa biasa diekspresikan sebagai fungsi polinomial dari jarak radial (dr) terhadap titik utama foto. Distorsi radial direpresentasikan dalam sebuah persamaan polinomial sebagai berikut (Wolf, 2000) :

$$\Delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 \quad (2.8)$$

Dimana istilah dari Δr adalah jumlah dari distorsi lensa radial, r adalah jarak radial dari *principal point*, dan K_1, K_2, K_3 merupakan koefisien polinomial dari distorsi radial. Efek yang terjadi apabila pada kamera memiliki nilai distorsi, maka gambar foto yang dihasilkan akan berbentuk cembung atau cekung, tergantung dari nilai parameter distorsi radial bernilai positif atau negatif (Wolf, 1993).

Menurut ASP (1980) dalam Wigrata (1986) dalam Hanifa (2007) distorsi tangensial adalah pergeseran linier titik di foto pada arah normal (tegak lurus) garis radial

melalui titik foto tersebut. Distorsi tangensial disebabkan kesalahan sentering elemen-elemen lensa dalam satu gabungan lensa dimana titik pusat elemen-elemen lensa dalam gabungan lensa tersebut tidak terletak pada satu garis lurus. Pergeseran ini biasa dideskripsikan dengan 2 persamaan polinomial untuk pergeseran pada arah x (Δx) dan y (Δy) (Atkinson, 1996).

$$\begin{aligned}\Delta_x &= P_1[r^2 + 2(x - x_0)^2] + 2P_2(x - x_0)(y - y_0) \\ \Delta_y &= P_2[r^2 + 2(x - x_0)^2] + 2P_2(x - x_0)(y - y_0)\end{aligned}\tag{2.9}$$

Dimana P_1 dan P_2 merupakan koefisien dari parameter distorsi tangensial yang nilainya tergantung dari nilai panjang fokus kamera. Efek dari distorsi tangensial ini akan menyebabkan kesan hiperbolik pada foto yang terekam oleh kamera.

Berdasarkan lokasi, kalibrasi kamera dapat dilakukan dengan metode *laboratory calibration* serta *on-the-job calibration*. *Laboratory calibration* dilakukan di laboratorium, terpisah dengan proses pemotretan objek. Metode yang termasuk di dalamnya antara lain *optical laboratory* dan *test range calibration*. Secara umum metode ini sesuai untuk kamera jenis metrik. Metode ini terdiri dari metode multikolimator dan goniometer di mana masing – masing memerlukan alat yang khusus dan mahal. Pada metode multikolimator, objek (berupa tanda silang kotak) yang akan dipotret diletakkan di atas sebuah pelat kaca, yang diproyeksikan melalui sejumlah kolimator individual yang dipasang dengan sudut θ tertentu (nilainya sudah diketahui) ke bidang fokus kamera. Dari tanda silang kotak yang terproyeksi pada bidang fokus dapat diukur panjang fokus ekuivalen dan radial lensa pada tiap pertambahan sudut θ .

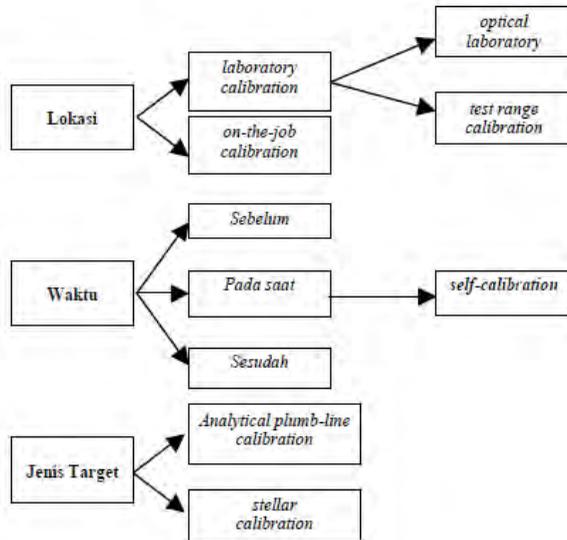
Pada metode goniometer, objek berupa pelat grid yang disinari dari belakang. Grid ini kemudian

diperoyeksikan melalui lensa kamera pada arah berlawanan. Sudut di mana sinar grid yang timbul, diukur dengan goniometer. Besarnya panjang fokus ekivalen dan distorsi radial lensa ditentukan dengan membandingkan sudut terukur sebenarnya terhadap sudut yang benar menurut teori.

On-the-job calibration merupakan teknik penentuan parameter kalibrasi lensa dan kamera yang dilakukan bersamaan dengan pelaksanaan pemotretan objek.

Berdasarkan waktu, kalibrasi kamera dapat dilakukan sebelum pemotretan, pada saat pemotretan, maupun sesudah pemotretan. Kalibrasi sebelum maupun sesudah pemotretan, biasa dilakukan di laboratorium atau di lokasi pemotretan. Kalibrasi pada saat pemotretan dikenal dengan *self-calibration*, yakni mengkalibrasi kamera sekaligus pada objek amat dan data diambil bersamaan dengan data observasi. Pada *self-calibration* pengukuran titik-titik target pada objek pengamatan digunakan sebagai data untuk penentuan titik objek sekaligus untuk menentukan parameter kalibrasi kamera (Atkinson, 1996).

Menurut Fryer (1989) dalam Effendi (2000), metode kalibrasi berdasarkan jenis target antara lain dengan *analytical plumb-line calibration* dan *stellar calibration*.



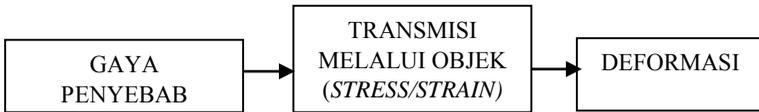
Gambar 2.5 Tipe Kalibrasi Kamera

Sumber : Hanifa, 2007

2.6 Pemantauan Deformasi Menggunakan Teknik Fotogrametri Jarak Dekat

Deformasi adalah perubahan bentuk, posisi, dan dimensi dari suatu benda atau sebagai perubahan kedudukan (pergerakan) suatu materi baik secara absolut maupun relatif dalam suatu kerangka referensi tertentu akibat suatu gaya yang bekerja pada materi tersebut (Kuang, 1996). Berdasarkan definisi tersebut, deformasi dapat diartikan sebagai perubahan kedudukan atau pergerakan suatu titik pada suatu benda secara absolut maupun relatif. Dikatakan titik bergerak absolut apabila dikaji dari perilaku gerakan titik itu sendiri dan dikatakan relatif apabila gerakan itu dikaji dari titik yang lain. Perubahan kedudukan atau pergerakan suatu titik pada umumnya mengacu kepada suatu sistem kerangka referensi (absolut atau relatif).

Prinsip dasar proses terjadinya deformasi adalah



Gambar 2.6 Prinsip Dasar Proses Deformasi
Sumber : Sarsito, 2007

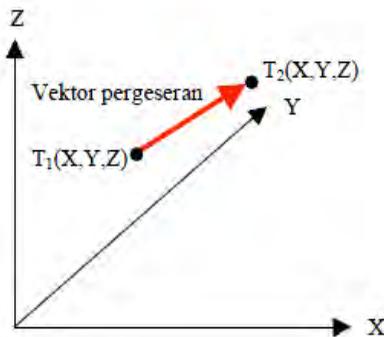
Untuk mendapatkan nilai dari vektor pergeseran, pengamatan yang kita lakukan harus lebih dari satu epok baik dalam interval lama pengamatan (episodik) maupun dalam interval dekat dan terus-menerus (kontinu) (Sarsito, 2007)

- a. Tipe episodik adalah pengamatan yang dilakukan secara berkala misalnya satu tahun sekali yang dapat diterapkan untuk informasi deformasi yang berlangsung lambat dan tidak memiliki dampak bencana yang besar.
- b. Tipe kontinu adalah pengamatan yang dilakukan secara terus menerus dengan pemasangan stasiun referensi tetap yang dapat diterapkan untuk pemantauan deformasi yang bersifat kontinu seperti pergerakan lempeng bumi.

Deformasi yang dimaksudkan dalam pemantauan survei ini adalah besarnya perubahan posisi suatu titik yang diamati pada jangka waktu tertentu secara kontinu.

Deformasi yang terjadi pada objek infrastruktur dapat disebabkan oleh faktor alam misalnya pergerakan tanah di lokasi berdirinya infrastruktur tersebut. Untuk mengetahui besar deformasinya, diperlukan monitoring posisi terhadap target yang terdapat pada infrastruktur. Target dapat berupa titik, garis atau bidang yang dapat dianggap mewakili objek infrastruktur. Monitoring dilakukan secara kontinu (*time series*). Dengan mengetahui posisi target di setiap pengamatan, nantinya perubahan posisi yang terjadi tersebut diolah dan dianalisis untuk diambil kesimpulan deformasinya.

Pemantauan deformasi dilakukan dengan cara mengamati perubahan koordinat objek sebagai fungsi dari waktu. Besarnya perubahan bagian-bagian pada objek tersebut dinyatakan melalui pengukuran koordinat-koordinatnya secara tiga dimensi. Pemantauan deformasi menggunakan teknik Fotogrametri Rentang Dekat pada prinsipnya tidak berbeda dengan metode geodetik lainnya, yakni dengan melakukan pengamatan terhadap perubahan koordinat titik objek dengan cara melakukan pengukuran pada waktu yang berbeda. Dari setiap pengamatan diperoleh koordinat titik-titik objek sehingga selanjutnya dapat dihitung vektor pergeseran (Gambar 2.7). Cara untuk menghitung pergeseran diberikan pada Persamaan (2.10). (Hanifa, 2007)



Gambar 2.7 Ilustrasi vektor pergeseran
Sumber : Hanifa, 2007

$$\text{vektor pergeseran} = \sqrt{(X_{T2} - X_{T1})^2 + (Y_{T2} - Y_{T1})^2 + (Z_{T2} - Z_{T1})^2} \quad (2.10)$$

X_{T1} , Y_{T1} dan Z_{T1} adalah koordinat titik T sebelum mengalami pergeseran dan X_{T2} , Y_{T2} dan Z_{T2} adalah koordinat titik T setelah mengalami pergeseran.

Secara garis besar pengukuran deformasi menggunakan teknik Fotogrametri Rentang Dekat dilakukan dalam beberapa tahapan pekerjaan, yaitu pengadaan titik-titik kontrol, pemotretan, kalibrasi kamera, pengolahan data serta analisis.

2.7 **Foto Udara Format Kecil**

Foto Udara Format Kecil (FUFK) atau *Small Format Aerial Photograph* merupakan foto yang dihasilkan dari kamera dengan ukuran film atau *frame* sekitar 24 mm x 36 mm dengan panjang fokus 35 mm (Warner, 1996) dalam (Puspita, 2007). Sistem lensa dari kamera tersebut tidak didesain untuk keperluan pemetaan (tidak dilengkapi *fiducial mark*, panjang fokus terkalibrasi lokasi titik utama tidak diketahui) dan dapat berupa kamera analog atau digital. Suatu wilayah memerlukan beberapa foto udara yang akan disusun menjadi *mosaic* foto udara. Menurut Wolf (1983), *mosaic* foto udara ialah gabungan dari dua atau lebih foto udara yang saling bertampalan sehingga terbentuk paduan citra yang berkesinambungan dan menampilkan daerah yang lebih luas. FUFK cukup potensial dimanfaatkan untuk penyediaan data spasial, antara lain berupa foto udara, ortofoto, mosaik ortofoto, dan peta garis.

Teknologi FUFK, pada dasarnya adalah menghasilkan foto udara dengan menggunakan kamera non metrik/kamera amatir (kamera yang tidak didesain untuk keperluan pemotretan udara) dan menggunakan pesawat ringan (*ultralight*). Warner et al (1996) mengklasifikasikan jenis kamera berdasarkan ukuran film (*frame*) dan panjang fokus kamera dalam 3 golongan, yaitu: kamera format standar, format medium, dan format kecil. Kamera format kecil memiliki ukuran film sekitar 24 mm x 36 mm dengan panjang fokus 35 mm serta ketebalan sekitar 0,05 mm, dapat berupa kamera analog atau digital. Kamera format kecil ini sistem lensanya tidak didesain untuk keperluan pemetaan

sehingga disebut kamera non metrik dan harganya relatif murah, tetapi sangat potensial memiliki distorsi geometri.

Distorsi geometrik pada FUFK cenderung lebih kompleks daripada foto udara standar (foto udara metrik), dan secara spesifik dapat dikelompokkan dalam 2 kondisi yaitu;

1. Kondisi intrinsik, kondisi ini disebabkan oleh nilai intrinsik dan stabilitas sistem lensa. Dalam komunitas fotogrametri, nilai intrinsik lebih dikenal sebagai parameter orientasi dalam (IOP, *interior orientation parameter*). Dan umumnya ditentukan dengan cara kalibrasi kamera.
2. Kondisi proses yang disebabkan oleh operasional penggunaan pesawat ringan untuk pemotretan. Jenis pesawat ini sangat dipengaruhi oleh kondisi angin dan ketidaksinkronan antara saat pemotretan dan kecepatan pesawat yang menyebabkan posisi (X, Y, Z) dan orientasi (ω , ϕ , κ) kamera pada saat pemotretan yang dapat sangat bervariasi antar foto. Kondisi proses pemotretan ini dapat menyebabkan: variasi skala yang beragam antar foto, ketidakteraturan pertampalan (*overlap*) foto udara baik ke arah jalur terbang dan antar jalur terbang, dan rasio B/H (*Base/Height Ratio*).

2.8 Ortorektifikasi

Ortorektifikasi adalah metode paling akurat dalam transformasi foto udara ke sebuah sistem koordinat tanah dan hal tersebut membutuhkan foto dengan nilai geometrik yang bagus. Di mana titik tanah tersebut dalam koordinat 3 dimensi yang diketahui (X,Y,Z) yang dapat ditransformasikan ke dalam koordinat foto (x,y). Secara umum terdapat dua model geometri gambar yang sering digunakan dalam ortorektifikasi bernama model kamera *rigorous* dan *rational function model* (RFM). Posisi dan orientasi sensor yang telah teridentifikasi, digunakan untuk

menghitung distorsi yang terdapat pada image. Model matematis yang digunakan pada ortorektifikasi adalah persamaan kolinear. (Yang, 2000). Ortorektifikasi adalah sebuah proses dari pengurangan distorsi permukaan dari suatu gambar/foto. Terdapat tiga tipe data yang dibutuhkan dalam proses ortorektifikasi yakni:

- i. Gambar digital. Contohnya adalah foto udara hasil proses *scanning* atau videografi yang akan direktifikasi.
- ii. Titik *Ground Control Point* (GCP). GCP dapat dikumpulkan dari data survei lapangan atau melalui GPS.
- iii. *Digital Elevation Model*. Adalah sebuah model dari permukaan bumi yang dibutuhkan untuk mengurangi distorsi foto udara.

Sedangkan metode ortorektifikasi, yang sering digunakan ada tiga macam :

- i. Polinomial berbasiskan perhitungan kuadrat terkecil pada GCP secara 2 dimensi
- ii. Rektifikasi proyeksi satu foto bereferensi pada datum ketinggian rata-rata menggunakan solusi fotogrametri dan koordinat GCP 3 dimensi
- iii. Koreksi *rigorous* diferensial menggunakan solusi fotogrametri dan sebuah DEM (Novak, 1992)

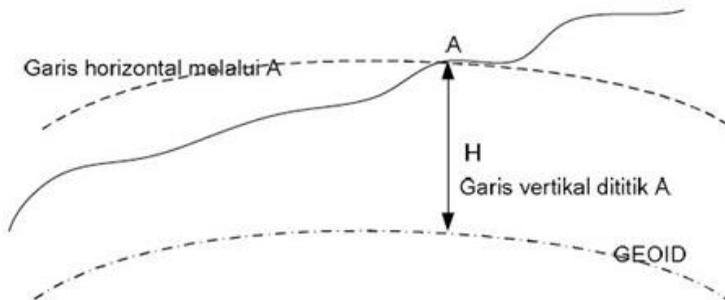
Sebuah model elevasi digital (DEM) digunakan untuk mengkoreksi bentuk permukaan dari suatu gambar. Kualitas dari ortofoto sangat dipengaruhi oleh akurasi dari DEM tersebut. Pemahaman tradisional menjelaskan bahwa dibutuhkan data ketinggian dari suatu titik pada fotogrametri analitikal dan survei darat. Informasi kontur juga dapat digunakan jika akurasinya masih berada pada batas normal. Pengukuran ketinggian dapat dilakukan dengan sistem *plotter* digital.

DEM mendefinisikan ketinggian permukaan bumi secara komputasi pada berbagai posisi planimetrik dari suatu permukaan. Ketinggian permukaan dari titik – titik didapat dengan menggunakan metode linier atau model derajat

tinggi. TIN (*triangular irregular network*) adalah model yang paling akurat ketika sumber data diambil secara acak. Model ini harus diubah ke dalam bentuk raster ketika digunakan dalam proses ortorektifikasi.

2.9 Tinggi Titik di Permukaan Bumi

Tinggi adalah jarak vertikal atau jarak tegak lurus dari suatu bidang referensi tertentu terhadap suatu titik sepanjang garis vertikalnya. Untuk suatu wilayah biasa *Mean Level Rise* ditentukan sebagai bidang referensi dan perluasannya ke daratan akan disebut dengan datum atau geoid (Anjasmara, 2005)



Gambar 2.8 Tinggi terhadap bidang referensi
Sumber : Anjasmara, 2005

Informasi tinggi yang ada di permukaan bumi pada umumnya dapat didefinisikan menjadi tiga jenis utama tinggi yaitu :

a. Tinggi Ellipsoid

Tinggi ellipsoid adalah jarak garis lurus yang diambil sepanjang bidang ellipsoid normal dari permukaan geometris yang diambil dari referensi ellipsoid ke titik tertentu (Featherstone, 2006). Ketinggian titik yang diberikan oleh GPS adalah ketinggian titik di atas permukaan ellipsoid.

b. Tinggi Dinamis

Sistem tinggi dinamis memiliki hubungan yang sangat kuat dengan sistem geopotensial. Sistem ini pernah dikembangkan oleh Helmert. Pada tinggi dinamis, gaya berat rata – rata diambil suatu harga berat normal standar bagi daerah yang bersangkutan, yaitu harga gaya berat normal yang dekat dengan nilai rata – rata di daerah itu (Featherstone, 2006).

c. Tinggi Ortometris

Tinggi ortometris suatu titik adalah jarak geometris yang diukur sepanjang unting – unting (*plumb line*) antara geoid ke titik tersebut. Tinggi ortometris merupakan tinggi yang sangat sulit direalisasikan karena hal yang perlu diketahui adalah arah tegak lurus dari percepatan gravitasi terhadap permukaan di semua titik yang berada sepanjang jarak tersebut (Featherstone, 2006).

d. Tinggi Normal

Tinggi normal adalah tinggi suatu titik yang bereferensi pada bidang quasigeoid. Tinggi normal pada awalnya dihitung untuk menghindari masalah dalam menentukan nilai rata – rata integral gravitasi pada gravitasi aktual sepanjang garis unting – unting. Pemodelan tinggi normal pertama kali diperkenalkan oleh Molodensky pada tahun 1945 (Featherstone, 2006).

2.10 Jembatan

Jembatan secara umum adalah suatu konstruksi yang dibangun untuk melewati suatu massa atau *traffic* lewat atas suatu penghalang atau rintangan seperti sungai, rel kereta api ataupun jalan raya. Penjelasan Pasal 86 ayat (3) PP No. 34 Tahun 2006 tentang Jalan menyebutkan bahwa yang dimaksud dengan jembatan adalah jalan yang terletak di atas permukaan air dan/atau di atas permukaan tanah.

Jenis jembatan sendiri dapat dibedakan berdasarkan fungsi, lokasi, dan bahan konstruksinya (Muntohar dan Supriyadi, 2007). Berdasarkan fungsinya, jembatan dapat dibedakan sebagai berikut :

- a. Jembatan jalan raya (*highway bridge*)
- b. Jembatan jalan kereta api (*railway bridge*)
- c. Jembatan pejalan kaki atau penyeberangan (*pedestrian bridge*)

Kalau berdasarkan lokasinya, jembatan dapat dibedakan sebagai berikut :

- a. Jembatan di atas sungai atau danau
- b. Jembatan di atas lembah
- c. Jembatan di atas jalan yang ada (*fly over*)
- d. Jembatan di atas saluran irigasi/drainase (*culvert*)
- e. Jembatan di dermaga (*jetty*)

Sedangkan berdasarkan bahan konstruksinya, jembatan dapat dibedakan sebagai berikut:

- a. Jembatan kayu (*log bridge*)
- b. Jembatan beton (*concrete bridge*)
- c. Jembatan beton prategang (*prestressed concrete bridge*)
- d. Jembatan baja (*steel bridge*)
- e. Jembatan komposit (*composite bridge*)

Secara garis besar, jembatan memiliki beberapa bagian antara lain :

- a. Struktur atas (*super structure*), yaitu semua bagian jembatan atas tumpuan yang terdiri dari tumpuannya sendiri, balok utama longitudinal atau *stringer/girder*, sistem lantai dan pengaku (*bracing/stiffener*). Bagian-bagian sekunder lain adalah parapet, dinding *railing*, anti kembang-susut, alat sambung dek dan sebagainya.
- b. Struktur bawah (*sub structure*), dibagi menjadi 2 bagian yaitu kepala jembatan (*abutments*) atau pilar (*pier*) dan pondasi untuk kepala jembatan atau pilar. Struktur bangunan bawah perlu didesain khusus sesuai dengan jenis kekuatan tanah dasar dan elevasi jembatan.

2.11 Jembatan Suramadu

Jembatan Nasional Suramadu adalah jembatan yang melintasi Selat Madura, menghubungkan Pulau Jawa (di Surabaya) dan Pulau Madura (di Bangkalan, tepatnya timur Kamal), Indonesia. Dengan panjang 5.438 m, jembatan ini merupakan jembatan terpanjang di Indonesia saat ini.

Jembatan Suramadu pada dasarnya merupakan gabungan dari tiga jenis jembatan dengan panjang keseluruhan sepanjang 5.438 meter dengan lebar kurang lebih 30 meter. Jembatan ini menyediakan empat lajur dua arah selebar 3,5 meter dengan dua lajur darurat selebar 2,75 meter. Jembatan ini juga menyediakan lajur khusus bagi pengendara sepeda motor disetiap sisi luar jembatan. Jembatan Suramadu terdiri dari tiga bagian yaitu jalan layang (*causeway*), jembatan penghubung (*approach bridge*), dan jembatan utama (*main bridge*). Berikut adalah konstruksi Jembatan Suramadu :

a. Jalan Layang

Jalan layang atau *Causeway* dibangun untuk menghubungkan konstruksi jembatan dengan jalan darat melalui perairan dangkal di kedua sisi. Jalan layang ini terdiri dari 36 bentang sepanjang 1.458 meter pada sisi Surabaya dan 45 bentang sepanjang 1.818 meter pada sisi Madura.

Jalan layang ini menggunakan konstruksi penyangga PCI dengan panjang 40 meter tiap bentang yang disangga pondasi pipa baja berdiameter 60 cm.

b. Jembatan Penghubung

Jembatan penghubung atau *approach bridge* menghubungkan jembatan utama dengan jalan layang. Jembatan terdiri dari dua bagian dengan panjang masing-masing 672 meter.

Jembatan ini menggunakan konstruksi penyangga beton kotak sepanjang 80 meter tiap bentang

dengan 7 bentang tiap sisi yang ditopang pondasi penopang berdiameter 180 cm.

c. Jalan Utama

Jembatan utama atau *main bridge* terdiri dari tiga bagian yaitu dua bentang samping sepanjang 192 meter dan satu bentang utama sepanjang 434 meter.

Jembatan utama menggunakan konstruksi *cable stayed* yang ditopang oleh menara kembar setinggi 140 meter. Lantai jembatan menggunakan konstruksi komposit setebal 2,4 meter.

Untuk mengakomodasi pelayaran kapal laut yang melintasi Selat Madura, jembatan ini memberikan ruang bebas setinggi 35 meter dari permukaan laut. Pada bagian inilah yang menyebabkan pembangunannya menjadi sulit dan terhambat, dan juga menyebabkan biaya pembangunannya membengkak.

Jembatan ini diresmikan awal pembangunannya oleh Presiden Megawati Soekarnoputri pada 20 Agustus 2003 dan diresmikan pembukaannya oleh Presiden Susilo Bambang Yudhoyono pada 10 Juni 2009. Pembangunan jembatan ini ditujukan untuk mempercepat pembangunan di Pulau Madura, meliputi bidang infrastruktur dan ekonomi di Madura, yang relatif tertinggal dibandingkan kawasan lain di Jawa Timur. Perkiraan biaya pembangunan jembatan ini adalah 4,5 triliun rupiah.

Pembuatan jembatan ini dilakukan dari tiga sisi, baik sisi Bangkalan maupun sisi Surabaya. Sementara itu, secara bersamaan juga dilakukan pembangunan bentang tengah yang terdiri dari *main bridge* dan *approach bridge* (Badan Pengembangan Wilayah Surabaya Madura, 2011).



Gambar 2.9 Jembatan Suramadu
Sumber : Wales, 2001

2.12 Resensi Penelitian Terdahulu

Penelitian ini dilakukan oleh S.A Veress pada tahun 1980. Judul penelitian tersebut adalah *Photogrammetry for Dimensional Control of Bridges*. Sebagai objek penelitian adalah segmen lengkung pada beton jembatan Vail Pass di Colorado di mana diukur dengan metode terestris/ *field control* dan dengan metode fotogrametri analitik. Titik kontrol diukur dengan teknologi invar *tape* untuk data jarak, pengukuran sudut menggunakan *Theodolite* dan ketinggian diukur menggunakan instrumen *levelling Kern* di mana jaring kontrol horizontal dihitung dengan konsep trilaterasi. Pengukuran secara fotogrametri analitik menggunakan tiga kamera metrik Hasselblad MK 70 pada Kodak Plus X Estar pada panjang fokus 60 mm dengan resolusi 85 dan 57lp/mm. Pada satu segmen dihasilkan 4 buah foto. Foto yang digunakan adalah hasil dari ploter analitik dari University of Washington dengan proses reduksi data yang dilakukan adalah reduksi data koordinat foto, reseksi spasial, identifikasi matriks orientasi dan interseksi spasial. Prinsip geometri pada proses fotogrametri analitik yaitu koordinat titik didapat dari ploter analitik kemudian ditransformasikan ke dalam sistem koordinat foto menggunakan koordinat

terkalibrasi dengan metode transformasi affine kemudian koordinat foto dikoreksi dari distorsi lensa. Hasil dari penelitian tersebut adalah standar kesalahan tiap foto kurang lebih 3 mikrometer, standar kesalahan rata-rata dari titik kontrol metode fotogrametri kurang lebih 1.1 milimeter dengan deviasi maksimal sebesar 13.1 mm. Pada penelitian tersebut juga dijelaskan bahwa dokumen dalam numeris dan grafis dapat digunakan untuk kepentingan pengecekan kualitas segmen. Kesimpulan pada penelitian tersebut menyatakan bahwa faktor yang mempengaruhi capaian akurasi adalah presisi dari jaring kontrol dan presisi keseluruhan dari metode fotogrametri sesuai dengan penentuan dimensi segmen (Veress, 1981).

Penelitian ini dilakukan oleh Lia Eka Elviani yang dilakukan pada tahun 2014. Judul penelitian tersebut adalah Analisa Deformasi Jembatan Suramadu dengan Teknik Fotogrametri Rentang Dekat. Pada penelitian ini, metodologi yang digunakan dalam penentuan deformasi Jembatan Suramadu adalah fotogrametri rentang dekat. Berdasarkan hasil penelitian tersebut, metode ini dapat digunakan karena sebagian besar koordinat titik pengukuran fotogrametri rentang dekat diterima dalam uji statistik *t-student* yang dibandingkan dengan koordinat hasil pengukuran *Electronic Total Station*. Teknologi yang digunakan adalah kamera digital non-metrik (menggunakan kamera DSLR). Berdasar hasil penelitian tersebut, teknologi ini dapat digunakan untuk penentuan deformasi dengan metode fotogrametri rentang dekat karena besar *RMS Error* titik GCP pada papan kalibrasi bernilai kurang dari 1mm. Penelitian tersebut berobyek pada analisa deformasi Jembatan Suramadu. Pada penelitian tersebut menggunakan program pengolah citra untuk *filterring* foto dan program MATLAB untuk. Program pengolah citra ini memiliki kelebihan dalam meningkatkan tampilan visual dari sebuah citra dengan berbagai teknik yang diusung seperti *contrast stretching* (menunjukkan citra

dengan kontras yang menyesuaikan dengan kecerahan piksel). Sedangkan program MATLAB memiliki kelebihan dalam membuat dan menjalankan perintah-perintah berisi formula – formula yang diinginkan. Berdasar hasil penelitian tersebut, terdapat deformasi di Jembatan Suramadu (bentang 102 di arah Madura) pada sumbu X dan Y (deformasi maksimal sebesar 79 mm dan deformasi minimal sebesar 1 mm) serta pada sumbu Z (deformasi maksimal sebesar 9 mm dan minimal sebesar 0 mm) (Elviani, 2014).

Berdasarkan kedua jenis penelitian tersebut, maka penelitian yang akan dilakukan akan mengambil metodologi yang sama dengan penelitian oleh Lia Eka Elviani yakni menggunakan teknik fotogrametri jarak dekat. Hal ini dikarenakan oleh beberapa hal. Pertama, metode ini adalah sebuah metode alternatif dengan kelebihan dalam pengukuran deformasi obyek berdimensi kecil seperti suatu jembatan yang susah dijangkau dan bersifat fleksibel dalam orientasi pengambilan data. Kedua, kelebihan dari teknologi kamera digital non metrik yang digunakan adalah harganya yang relatif murah daripada penggunaan kamera metrik. Selain itu, karena penelitian yang akan dilakukan ini berfokus pada kedua ujung objek jembatan, maka penggunaan metode fotogrametri jarak dekat tepat karena cakupan data hanya per titik sehingga akan memperkecil biaya saat penelitian

BAB III METODOLOGI

3.1 Lokasi Penelitian

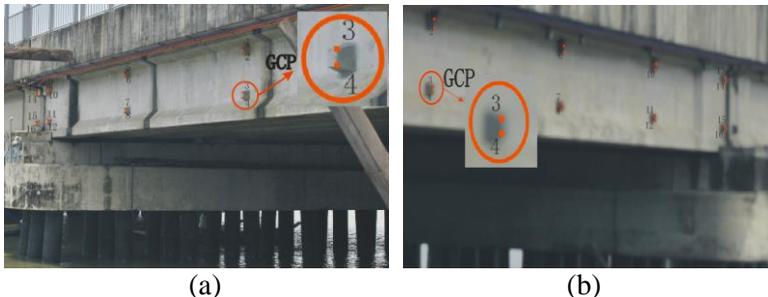
Lokasi penelitian adalah Jembatan Suramadu yang berada pada koordinat geografis $7^{\circ}11'3''$ LS dan $112^{\circ}46'48''$ BT (titik di bentang tengah jembatan). Jembatan ini terhubung langsung dengan Pulau Madura (Kabupaten Bangkalan) di sebelah utara dan Pulau Jawa (Kota Surabaya) di sebelah selatan. Fokus lokasi penelitian ini adalah sisi Gresik dari jembatan di bentang 1 (antara *Abutment* Surabaya dan pilar 1) kemudian disebut sebagai arah Surabaya dan di bentang 100 (antara pilar 99 dan 100) yang kemudian disebut sebagai arah Madura.



Gambar 3.1 Lokasi Penelitian
Sumber : KementerianPU, 2012



Gambar 3.2 Jembatan Suramadu
Sumber : Wales, 2001



Gambar 3.3 Letak Titik Kontrol pada Bentang Jembatan Suramadu (a) Arah Surabaya (b) Arah Madura

3.2 Data dan Peralatan

3.2.1 Data

Data yang diperlukan dalam penelitian ini antara lain :

- Bidang Kalibrasi Kamera 2D berupa papan catur (*chesboard*) beserta foto bidang kalibrasi tersebut.
- Data spesifikasi kamera digital non-metrik Nikon D3000.
- Data ukuran *Bench Mark* (BM) yang diukur menggunakan metode *differencial positioning* dengan akurasi horizontal 3 mm dan vertikal 5 mm.
- Data ukuran *Ground Control Point* (GCP) pada jembatan yang diukur menggunakan metode pengikatan kemua dengan akurasi sudut 5" dan akurasi jarak $\pm -(2 \text{ mm} + 2\text{ppmxD})$.
- Foto – foto bangunan objek penelitian.

3.2.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terbagi dalam kelompok *hardware* (perangkat keras) dan *software* (perangkat lunak) yaitu sebagai berikut:

- Perangkat Keras (*Hardware*)

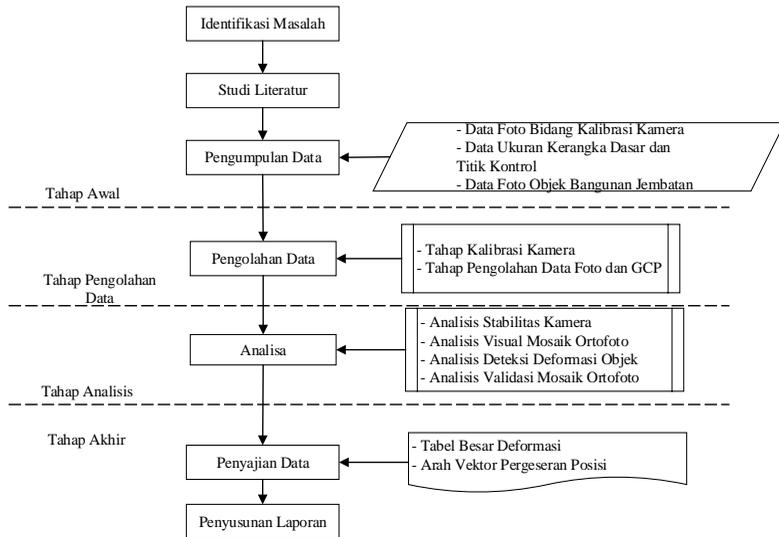
- i. Kamera digital non – metrik SLR Nikon D3000 sebagai alat pengambilan data foto.
 - ii. *Electronic Total Station* (ETS) untuk pengukuran *Ground Control Point* (GCP) pada jembatan dan stasiun pemotretan.
 - iii. 2 set *Receiver* GPS Geodetik untuk pengukuran kerangka dasar.
 - iv. Laptop dengan spesifikasi RAM 2 GB, processor AMD A4-5000 APU with Radeon (TM) sebagai alat pengolahan data.
 - v. Mistar *glass* sebagai alat pengukur objek bidang kalibrasi.
- b. Perangkat Lunak (*Software*)
- i. Program fotogrametri dan MATLAB untuk pengolahan data.
 - ii. Perangkat lunak pengolah teks untuk penyajian dan pelaporan hasil penelitian.
 - iii. Perangkat lunak *plotting* koordinat untuk penyajian koordinat GCP.

Tabel 3.1 Data Spesifikasi Kamera Nikon D3000

Spesifikasi	Keterangan
Effective Pixels	10 megapixels, 11 megapixels sensor photo detectors
Image Sensor	CCD sensor, APS-C (23.6 x 15.8 mm) sensor size
Image Size (pixels)	Max resolution 3872 x 2592, other resolution 2896 x 1944 and 1936 x 1296, 3:2 image ratio
Dimensions (W x H x D)	126 x 97 x 64 mm (4.96 x 3.82 x 2.52")
Weight	536 g (1.18 lb / 18.91 oz) inc. battery

3.3 Metodologi Penelitian

Tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah:



Gambar 3.4 Diagram Alir Tahapan Penelitian

3.3.1 Tahap Persiapan

Pada tahap ini, kegiatan yang dilakukan adalah:

a. Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah dilakukan untuk menentukan dan membatasi permasalahan yang akan diselesaikan dalam penelitian ini. Permasalahan dalam penelitian ini adalah deformasi yang terjadi pada Jembatan Suramadu dengan cara ortorektifikasi foto objek.

b. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan referensi dan pemahaman lebih materi yang terkait dengan permasalahan yang ingin diselesaikan yakni fotogrametri dan survei

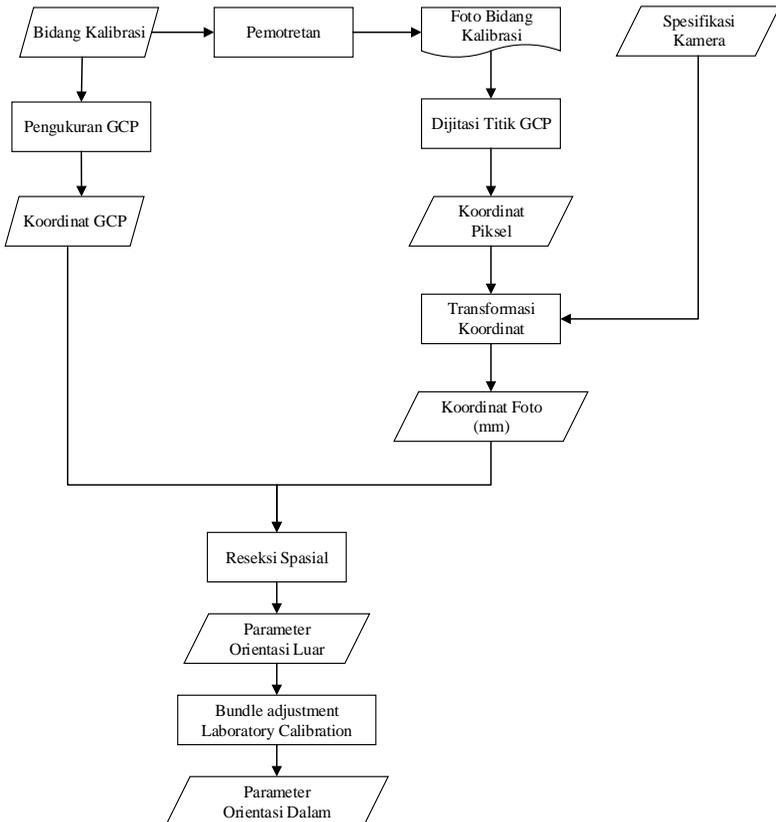
deformasi. Studi literatur diperoleh dari buku, jurnal, internet dan sebagainya.

- c. **Persiapan Peralatan dan Perizinan Lokasi**
 Pada penelitian ini dilakukan persiapan peralatan baik *hardware* maupun *software* yang akan digunakan. Kegiatan perizinan terkait dengan proses pengumpulan data akan dilakukan kepada pengelola bangunan Jembatan Suramadu.
- d. **Pengumpulan Data**
 Proses pengumpulan data merupakan kegiatan mencari dan mengumpulkan data yang diperlukan dalam penelitian. Pengumpulan data dilakukan dalam dua kala pengamatan. Teknik pengumpulan data pada penelitian ini adalah pencetakan dan pengambilan foto bidang kalibrasi, pengukuran BM, pengukuran GCP, dan pengambilan foto Jembatan Suramadu. Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap. Tahap pertama, melakukan kalibrasi kamera untuk menentukan parameter eksterior dan interior kamera yang digunakan. Tahap kedua, melakukan pengukuran kerangka dasar dan koordinat titik kontrol. Tahap ketiga, melakukan proses pengambilan foto bangunan Jembatan Suramadu. Tahap keempat, melakukan pengolahan data kalibrasi kamera, pengukuran BM dan GCP serta foto bangunan jembatan. Tahap kelima, melakukan penyajian dan pelaporan hasil penelitian.

3.3.2 Tahap Pengolahan Data

- a. **Tahap Kalibrasi Kamera**
 Kalibrasi kamera dilakukan dengan menggunakan aplikasi pemograman MATLAB berdasarkan *bundle adjustment laboratory*

calibration. Tahap kalibrasi kamera ditunjukkan dalam diagram alir berikut :

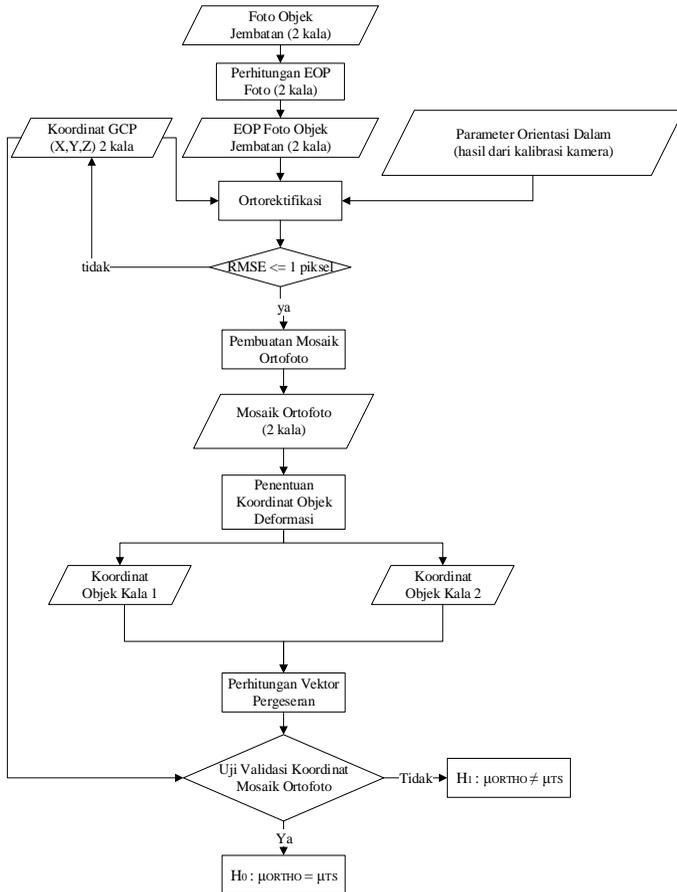


Gambar 3.5 Diagram Alir Tahapan Kalibrasi Kamera

Pada tahap ini dilakukan berbagai kegiatan sebagai berikut :

- i. Pencetakan bidang kalibrasi pada kertas A4 (21 cm x 29,7 cm)
- ii. Menentukan dan mengukur titik GCP pada bidang kalibrasi menggunakan mistar *glass*

- untuk mendapatkan koordinat GCP (dalam satuan cm).
- iii. Melakukan pemotretan bidang kalibrasi.
 - iv. Melakukan digitasi GCP pada foto – foto bidang kalibrasi tersebut untuk mendapatkan koordinat GCP dalam satuan piksel.
 - v. Melakukan transformasi koordinat GCP pada foto dalam satuan piksel ke koordinat GCP dalam satuan milimeter.
 - vi. Melakukan proses reseksi spasial untuk mendapatkan nilai parameter orientasi luar (EOP).
 - vii. Melakukan proses *Bundle Adjustment Laboratory Calibration* untuk mendapatkan nilai parameter orientasi dalam (IOP) yakni panjang fokus kamera (f), koordinat *principal point* (x_0, y_0) serta distorsi radial dan tangensial (k_1, k_2, k_3, p_1 dan p_2).
- b. Tahap Pengolahan Data Foto dan GCP
Tahap pengolahan data Foto dan GCP pada penelitian ini ditunjukkan dalam diagram alir berikut :



Gambar 3.6 Diagram Alir Tahap Pengolahan Data Foto dan GCP

Tahap pengolahan data foto dan GCP yang dilakukan terdiri dari beberapa kegiatan sebagai berikut :

- i. Data pengukuran kerangka dasar merupakan acuan pengukuran GCP dalam sistem koordinat UTM. Koordinat GCP ini

- akan digunakan sebagai ukuran referensi untuk menentukan unsur – unsur objek penelitian yang tampak di foto.
- ii. Setelah melakukan pengukuran titik kontrol, pemotretan akan dilakukan untuk mendapatkan data foto objek Jembatan Suramadu. Pengambilan foto akan dilakukan di darat pada ujung Surabaya dan Madura. Foto diambil secara bebas menggunakan kamera digital SLR dari sembarang posisi dan orientasi.
 - iii. Melakukan koreksi geometrik yakni dengan cara ortorektifikasi foto objek menggunakan data koordinat GCP 3 dimensi pada jembatan. Terlebih dahulu mencari nilai parameter orientasi luar dari foto objek Jembatan Suramadu. Setelah itu dilakukan proses ortorektifikasi menggunakan program fotogrametri dengan masukan data berupa parameter hasil kalibrasi kamera dan parameter orientasi luar foto Suramadu.
 - iv. Setelah itu melakukan proses pembuatan mosaik ortofoto untuk pengamatan dua kala yang selanjutnya akan dilakukan penentuan koordinat 3 dimensi dari objek yang dicari deformasinya.
 - v. Setelah diperoleh koordinat 3D titik-titik GCP pada mosaik ortofoto objek bangunan dari kala 1 dan 2, kemudian akan dilakukan perhitungan vektor pergeseran untuk mengetahui kemungkinan adanya deformasi objek dengan menghitung besar pergeserannya dan menguji validasi koordinat mosaik ortofoto terhadap koordinat hasil pengukuran terestris. Dari hasil

perhitungan tersebut akan dilakukan analisa untuk mengetahui apakah terdapat pergeseran posisi pada jembatan.

3.3.3 Tahap Analisis

Pada tahap ini akan dilakukan beberapa analisis sebagai berikut :

- a. Analisis stabilitas kamera
- b. Analisis visual mosaik ortofoto
- c. Analisis deteksi deformasi objek
- d. Analisis validasi mosaik ortofoto

3.3.4 Tahap Akhir

Pada tahap ini akan dilakukan proses penafsiran hasil penelitian dalam berbagai bentuk. Nilai deformasi vertikal dan horizontal yang terjadi pada jembatan secara kuantitatif akan ditunjukkan dalam sebuah tabel dalam satuan milimeter. Secara visual, deformasi vertikal dan horizontal yang terjadi pada jembatan akan ditunjukkan dalam bentuk arah vektor pergeseran posisi.

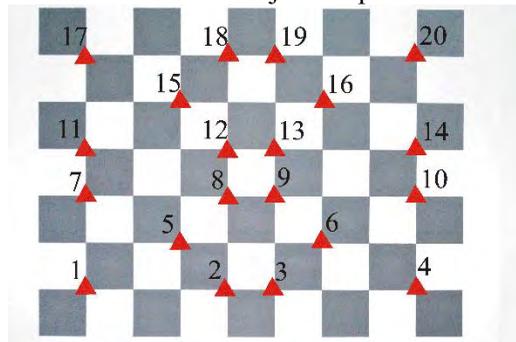
Pada tahap ini juga akan dilakukan proses penarikan kesimpulan berdasarkan analisis. Hasil dari penafsiran data dan penarikan kesimpulan akan disusun dalam bentuk laporan tertulis untuk memberikan tambahan ilmu baik secara praktis maupun secara teoritis untuk pengembangan selanjutnya.

BAB IV HASIL DAN ANALISA

4.1 Hasil Tahapan Kalibrasi Kamera

4.1.1 Hasil Pengukuran GCP Bidang Kalibrasi

Bidang kalibrasi merupakan bidang papan catur (*chessboard*) dengan ukuran A4 (21 mm x 29,7 mm). Pengukuran GCP pada bidang kalibrasi dilakukan menggunakan mistar *glass* dengan skala milimeter. Pusat koordinat (0,0) bidang kalibrasi berada pada pojok kiri bawah. Titik pusat koordinat ini ditandai sebagai titik 1. Koordinat dalam sumbu Z bernilai nol karena bidang kalibrasi merupakan bidang datar. Foto bidang kalibrasi kamera beserta letak 20 GCP ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Bidang Kalibrasi Kamera beserta Lokasi 20 GCP

Hasil pengukuran koordinat GCP pada bidang kalibrasi disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Koordinat GCP pada Bidang Kalibrasi dalam Sistem Koordinat Tanah (Satuan mm)

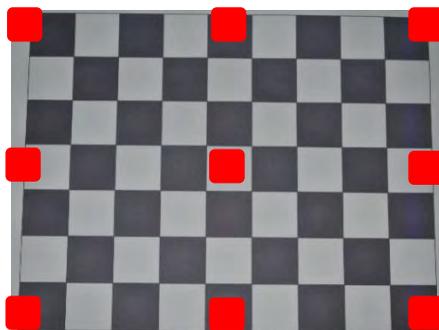
Titik	X	Y	Z
1	0.000	0.000	0.000
2	84.000	0.000	0.000

Tabel 4.1 Koordinat GCP pada Bidang Kalibrasi dalam Sistem Koordinat Tanah (Satuan mm)
(lanjutan)

Titik	X	Y	Z
3	112.000	0.000	0.000
4	196.000	0.000	0.000
5	56.000	28.000	0.000
6	140.000	28.000	0.000
7	0.000	56.000	0.000
8	84.000	56.000	0.000
9	112.000	56.000	0.000
10	196.000	56.000	0.000
11	0.000	84.000	0.000
12	84.000	84.000	0.000
13	112.000	84.000	0.000
14	196.000	84.000	0.000
15	56.000	112.000	0.000
16	140.000	112.000	0.000
17	0.000	140.000	0.000
18	84.000	140.000	0.000
19	112.000	140.000	0.000
20	196.000	140.000	0.000

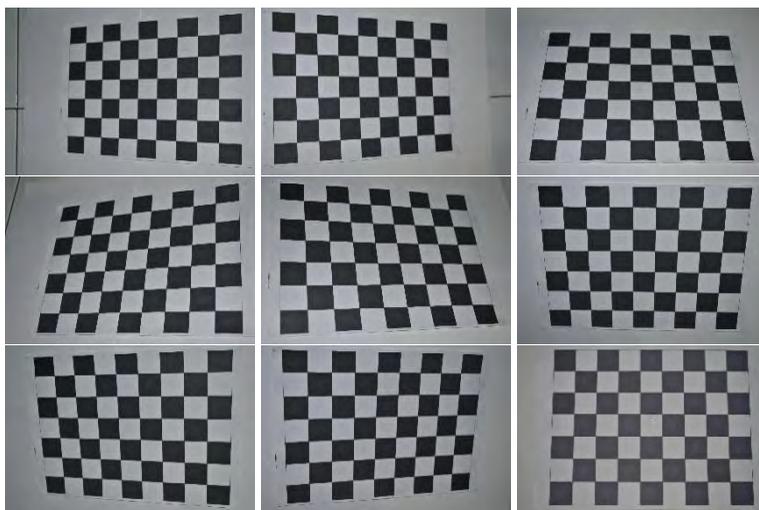
4.1.2 Hasil Pemotretan Bidang Kalibrasi

Pemotretan bidang kalibrasi dilakukan menggunakan kamera DSLR seri D3000 dengan panjang fokus sebesar 35 mm. Pemotretan dilakukan dari 9 arah yang berbeda sehingga dihasilkan 9 buah foto yang akan digunakan dalam proses kalibrasi. Posisi 9 arah pengambilan foto bidang kalibrasi ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Bidang Kalibrasi Papan Catur Beserta Gambaran Posisi Pemotretan (Kotak Merah)

Sedangkan foto - foto yang didapat setelah proses pemotretan ditunjukkan dalam Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Foto Bidang Kalibrasi yang Diambil dari 9 Posisi Kamera yang Berbeda

4.1.3 Hasil Dijitasi Titik GCP Bidang Kalibrasi

Dijitasi GCP pada bidang kalibrasi dilakukan menggunakan program MATLAB. Hasil yang didapat dari proses dijitasi ini adalah koordinat GCP bidang kalibrasi dalam sistem koordinat piksel. Nilai sumbu Z pada sistem koordinat piksel bernilai nol karena foto bidang kalibrasi merupakan bidang datar. Koordinat GCP hasil proses dijitasi pada Foto 1 ditunjukkan dalam Tabel 4.2. Sedangkan koordinat GCP hasil proses dijitasi pada semua foto dapat dilihat pada Lampiran 2.

Tabel 4.2 Koordinat GCP Bidang Kalibrasi (Satuan Piksel) pada Foto 1 dalam Sistem Koordinat Piksel

Titik	X	Y	Z
1	585.000	2149.000	0.000
2	1638.000	2157.000	0.000
3	1994.000	2157.000	0.000
4	3056.000	2164.000	0.000
5	1290.000	1793.000	0.000
6	2360.000	1801.000	0.000
7	585.000	1444.000	0.000
8	1647.000	1444.000	0.000
9	2003.000	1444.000	0.000
10	3065.000	1452.000	0.000
11	576.000	1088.000	0.000
12	1647.000	1088.000	0.000
13	2003.000	1088.000	0.000
14	3065.000	1088.000	0.000
15	1290.000	732.000	0.000
16	2360.000	739.000	0.000
17	585.000	376.000	0.000
18	1647.000	376.000	0.000
19	2003.000	376.000	0.000

Tabel 4.2 Koordinat GCP Bidang Kalibrasi (Satuan Piksel) pada Foto 1 dalam Sistem Koordinat Piksel (lanjutan)

Titik	X	Y	Z
20	3065.000	383.000	0.000

4.1.4 Hasil Transformasi Koordinat GCP dari Sistem Koordinat Piksel ke Sistem Koordinat Foto (mm)

Koordinat foto dalam satuan milimeter didapat dari perhitungan koordinat piksel menggunakan informasi sensor dari kamera. Perhitungan transformasi dilakukan menggunakan program pengkodean MATLAB. Sumbu Z pada sistem koordinat foto bernilai nol karena bidang kalibrasi merupakan bidang datar. Hasil transformasi koordinat GCP bidang kalibrasi kamera dari sistem koordinat piksel ke sistem koordinat foto dalam satuan milimeter pada Foto 1 ditunjukkan pada Tabel 4.3. Sedangkan sistem koordinat foto hasil transformasi koordinat untuk semua foto dapat dilihat pada Lampiran 3.

Tabel 4.3 Titik GCP Foto 1 dalam Sistem Koordinat Foto (Satuan mm) Hasil Transformasi Koordinat

Titik	X	Y	Z
1	-8.231	-5.203	0.000
2	-1.813	-5.251	0.000
3	0.357	-5.251	0.000
4	6.830	-5.294	0.000
5	-3.934	-3.033	0.000
6	2.587	-3.081	0.000
7	-8.231	-0.905	0.000
8	-1.758	-0.905	0.000
9	0.411	-0.905	0.000

Tabel 4.3 Titik GCP Foto 1 dalam Sistem Koordinat Foto (Satuan mm)
 Hasil Transformasi Koordinat (lanjutan)

Titik	X	Y	Z
10	6.884	-0.954	0.000
11	-8.286	1.265	0.000
12	-1.758	1.265	0.000
13	0.411	1.265	0.000
14	6.884	1.265	0.000
15	-3.934	3.435	0.000
16	2.587	3.392	0.000
17	-8.231	5.605	0.000
18	-1.758	5.605	0.000
19	0.411	5.605	0.000
20	6.884	5.562	0.000

4.1.5 Hasil Proses Reseksi Spasial

Proses reseksi spasial dilakukan untuk mencari parameter orientasi eksternal yakni sudut rotasi kamera saat pemotretan (ω , ϕ dan κ) serta posisi kamera (XL, YL, ZL). Prinsip dasar proses ini menggunakan konsep kesejarisan / kolinearitas. Proses reseksi spasial dilakukan menggunakan program pengkodean MATLAB dengan data masukan berupa koordinat GCP bidang kalibrasi dalam sistem koordinat tanah (dalam satuan mm) dan sistem koordinat foto (dalam satuan mm). Parameter orientasi luar Foto 1 sebagai hasil dari proses reseksi spasial disajikan pada Tabel 4.4. Parameter orientasi luar pada semua foto dapat dilihat pada Lampiran 4.

Tabel 4.4 Parameter Orientasi Luar Foto 1

Omega (rad)	Phi (rad)	Kappa (rad)	XL (mm)	YL (mm)	ZL (mm)
-0.008	0.003	0.003	108.452	71.341	452.982

4.1.6 Hasil Proses *Bundle Adjustment Laboratory Calibration*

Proses kalibrasi *bundle adjustment laboratory calibration* dilakukan untuk mengetahui nilai parameter hasil kalibrasi kamera yang digunakan. Pada proses ini, titik – titik kontrol / GCP juga digunakan dalam kalibrasi. Proses kalibrasi dilakukan menggunakan program MATLAB dengan hasil berupa parameter orientasi dalam yaitu nilai titik pusat foto terkalibrasi (x_0 , y_0), panjang fokus terkalibrasi (f), parameter distorsi radial (k_1 , k_2 , k_3) dan parameter distorsi tangensial (p_1 , p_2) kamera. Nilai dari parameter merupakan nilai yang didapat setelah melalui proses iterasi sebanyak 12 kali. Semua parameter ini akan digunakan dalam proses ortorektifikasi foto. Parameter kalibrasi dari 9 foto dalam satuan milimeter disajikan pada Tabel 4.5. Besarnya perubahan nilai parameter kalibrasi di tiap iterasi dapat dilihat pada Lampiran 5.

Tabel 4.5 Parameter Orientasi Dalam 9 Foto

IOP	Nilai
x0 (mm)	-0.7350
y0 (mm)	0.3339
f (mm)	34.4776
k1 (mm)	-0.0001
k2 (mm)	0.0000
k3 (mm)	0.0000
p1 (mm)	0.0002
p2 (mm)	0.0000

4.1.7 Analisa Stabilitas Kamera

Analisa stabilitas kamera dapat dilihat melalui perubahan parameter kalibrasi kamera di setiap iterasi. Berdasarkan tabel nilai selisih

parameter orientasi dalam 9 foto setiap iterasi menunjukkan bahwa kekonstanan nilai perubahan tiap parameter berbeda – beda satu dengan lainnya. Untuk nilai x_0 , mencapai nilai konstan pada iterasi ke 8. Untuk parameter y_0 dan k_1 mencapai nilai konstan pada iterasi ke 7. Parameter panjang fokus mencapai nilai konstan pada iterasi ke 9. Parameter k_2 mencapai nilai konstan pada iterasi ke 8. Parameter k_3 mencapai nilai konstan pada iterasi ke 10. Sedangkan parameter p_1 dan p_2 masih mengalami perubahan nilai selisih hingga iterasi ke 12. Nilai parameter orientasi dalam yang digunakan untuk proses selanjutnya adalah nilai setelah mengalami iterasi ke 12 karena semua nilai parameter sudah konstan pada iterasi ke 12. Perubahan panjang fokus dan parameter lain dapat menandakan kesesuaian penggunaan kamera digital SLR Nikon D300 dalam proses fotogrametri. Kamera dengan resolusi tinggi dan distorsi lensa yang rendah dapat digunakan untuk keperluan fotogrametri. Sedangkan kamera dengan distorsi lensa yang lebih besar disebut dengan kamera *reconnaissance* yang didesain untuk keperluan interpretasi dan inventarisasi, bukan untuk keperluan fotogrametri. Kamera jenis ini adalah kamera multispektral dan kamera yang memiliki panjang fokus 35 mm - 70 mm. (Berlin, 1992). Kepentingan fotogrametri umumnya menggunakan kamera format besar dimana presisi maksimum sumbu vertikal sebesar 1/1000 dari tinggi terbang. Sedangkan kamera format kecil hanya memiliki akurasi separuh dari kamera format besar (Fryer, 1994). Kamera Nikon DSLR seri D3000 merupakan kamera berformat kecil karena memiliki panjang fokus 35 mm – 55 mm. Selain itu, kamera ini

memiliki distorsi lensa yang cukup besar karena nilainya dapat mencapai konstan saat iterasi ke 7 sehingga hal ini menandakan bahwa penggunaan kamera DSLR Nikon D3000 tidak sesuai untuk keperluan fotogrametri metrik.

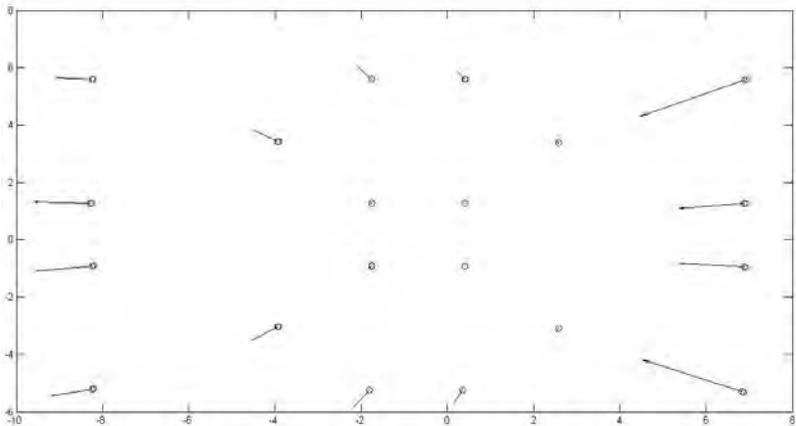
Selain melihat stabilitas kamera, berdasar hasil parameter orientasi dalam juga dapat dicari analisa distorsi kamera yang terjadi. Distorsi kamera dapat diketahui dengan melihat visualisasi perubahan koordinat foto sebelum dan setelah terkalibrasi. Perubahan nilai koordinat foto tersebut merupakan kesalahan koordinat foto yang disebut dengan *reprojection error*. Nilai kesalahan koordinat didapat dengan menghitung perubahan koordinat terhadap nilai *principal point* dan parameter distorsi kamera. Nilai dan visualisasi *reprojection error* foto 1 disajikan pada Tabel 4.6 dan Gambar 4.4 berikut ini. Nilai dan visualisasi *reprojection error* selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 6 dan Lampiran 7.

Tabel 4.6 Nilai Reprojection Error Foto 1 (Satuan mm)

Titik	X	Y
1	-0.019	-0.005
2	-0.007	-0.012
3	-0.004	-0.008
4	-0.045	0.022
5	-0.012	-0.009
6	-0.001	-0.003
7	-0.026	-0.004
8	-0.001	-0.001
9	0.000	0.000
10	-0.030	0.003
11	-0.026	0.001
12	-0.001	0.001

Tabel 4.6 Nilai *Reprojection Error* Foto 1 (Satuan mm)
(lanjutan)

Titik	X	Y
13	0.000	0.000
14	-0.030	-0.003
15	-0.011	0.007
16	-0.002	0.001
17	-0.016	0.001
18	-0.006	0.009
19	-0.003	0.005
20	-0.047	-0.024



Gambar 4.4 Visualisasi Kesalahan Koordinat Foto Awal dan Koordinat Foto Terkoreksi

Keterangan :

○: GCP awal, ○: GCP terkoreksi

Berdasarkan tabel nilai *reprojection error* dapat dilihat bahwa nilai kesalahan koordinat foto sebelum dan setelah terkoreksi tidak besar dengan kesalahan minimal 0.0001 mm dan kesalahan maksimal sebesar 0.0472 mm. Untuk GCP yang

berada dekat dengan pusat foto (titik 8,9,12 dan 13) memiliki nilai kesalahan koordinat yang sangat kecil yaitu antara 0.0001 mm sampai dengan 0.0011 mm. Sedangkan GCP yang berada jauh dari pusat foto memiliki nilai kesalahan yang besar hal ini dapat dilihat melalui nilai kesalahan terbesar pada sumbu X dan Y berada pada titik 20 (-0.0472, -0.0244 mm). Dengan melihat visualisasi distorsi lensa, diketahui bahwa titik – titik GCP awal pada sumbu X positif mengalami pergeseran ke arah kiri mengarah ke pusat foto. Sedangkan GCP yang berada pada sumbu X negatif bergeser menjauhi pusat foto. Hal ini menandakan lensa kamera mengalami distorsi.

Untuk mengetahui jenis distorsi lensa yang terjadi maka dapat dicari dari nilai kesalahan radial. Nilai kesalahan radial dihitung dengan cara mengalikan koefisien distorsi radial dengan jarak radial tiap titik kontrol point. Perkalian ini mengikuti deret aritmatika dimana nilai jarak radial mengalami kenaikan order perkalian di tiap koefisien radial yang berbeda. Jika nilai kesalahan radial < 1 maka jenis distorsi lensanya adalah distorsi *barrel* (cembung) dan jika nilai kesalahan radial > 1 maka jenis distorsi lensanya adalah distorsi *pincushion* (cekung) (Hugemann, 2010). Nilai kesalahan radial dalam satuan milimeter dari foto 1 disajikan pada Tabel 4.7. Nilai kesalahan radial untuk kesembilan foto dapat dilihat pada Lampiran 8.

Tabel 4.7 Nilai Kesalahan Radial Foto 1 (Satuan mm)

Foto	x (mm)	y (mm)
1	-0.014	-0.010
2	0.002	0.008
3	-0.002	0.008

Tabel 4.7 Nilai Kesalahan Radial Foto 1 (Satuan mm)
(lanjutan)

Foto	x (mm)	y (mm)
4	0.015	-0.011
5	0.005	0.005
6	-0.005	0.005
7	-0.001	0.000
8	0.000	0.000
9	0.000	0.000
10	0.002	0.000
11	-0.001	0.000
12	0.000	0.000
13	0.000	0.000
14	0.002	0.000
15	0.005	-0.005
16	-0.005	-0.005
17	-0.013	0.009
18	0.002	-0.008
19	-0.002	-0.008
20	0.014	0.010

Berdasarkan nilai kesalahan radial yang ditunjukkan pada tabel di atas dapat dilihat bahwa nilai kesalahan radial untuk semua titik kurang dari 1. Hal ini menandakan bahwa lensa kamera Nikon D3000 mengalami *barrel distortion*.

Untuk mengetahui kesalahan dari *reprojection error*, dihitung nilai *Root Mean Square Error* (RMS) dari nilai *reprojection error* tersebut. RMSE dihitung dengan mencari *reprojection error*, setelah itu tiap nilai *error* dikuadratkan. Jumlah dari

kuadrat *error* kemudian dicari reratanya berdasar jumlah GCP. Hasil rerata tersebut kemudian diakar kuadrat sehingga ditemukan nilai RMSE untuk koordinat X dan Y. Hasil perhitungan RMSE untuk semua foto ditunjukkan pada Tabel 4.8. Berdasar nilai RSME 9 foto pada Tabel 4.8, maka dapat dilihat bahwa semua nilai RMSE kesembilan foto kurang dari 1 mm dengan nilai maksimum untuk koordinat X sebesar 0.0271 mm dan untuk koordinat Y sebesar 0.0089 mm. Hal ini menunjukkan bahwa kamera digital non metrik dapat digunakan untuk proses ortorektifikasi foto format kecil dalam fotogrametri jarak dekat.

Tabel 4.8 Nilai RMS error 9 Foto (Satuan mm)

FOTO	RMSE	
	X (mm)	Y (mm)
1	0.021	0.009
2	0.020	0.009
3	0.020	0.008
4	0.025	0.008
5	0.027	0.008
6	0.024	0.007
7	0.025	0.008
8	0.025	0.009
9	0.022	0.008

4.2 Hasil Tahapan Pengolahan Data Foto dan GCP

4.2.1 Hasil Pengukuran Koordinat GCP Menggunakan Total Station

Titik kontrol pada penelitian ini merupakan titik – titik yang diambil pada dua sudut dari penutup angkur *stressing diafragma* di

bentang Jembatan Suramadu yang diukur menggunakan alat *Total Station*. Titik kontrol ini merupakan titik acuan yang akan digunakan dalam proses ortorektifikasi pada foto Jembatan Suramadu. Pengukuran ini menggunakan metode pengikatan kemuka dimana koordinat titik yang ditentukan dapat dicari dari 2 buah titik tetap yang sudah diketahui, kemudian diukur sudut dan jarak dari titik tetap ke arah titik yang akan dicari koordinatnya (Supadiningsih, 2004). Sistem koordinat yang digunakan pada pengukuran ini adalah sistem koordinat UTM yang mengacu pada kerangka dasar 4 buah *Bench Mark*. 2 Buah BM berada di sisi Surabaya dan 2 buah BM berada di sisi Madura. Kerangka dasar ini diukur menggunakan alat GPS Geodetik dengan metode pengukuran *Differencial Positioning* yaitu penentuan posisi suatu titik secara relatif terhadap titik lainnya yang telah diketahui koordinatnya (Abidin, 2006) di mana *Receiver* GPS Geodetik sebagai *rover* diletakkan di posisi BM sedangkan *base* berada di lantai 4 Gedung Jurusan Teknik Geomatika - ITS Surabaya. Koordinat titik BM ditunjukkan dalam Tabel 4.9 berikut ini.

Tabel 4.9 Koordinat Titik Bench Mark dalam Sistem Koordinat UTM
(Satuan meter)

Titik	Koordinat dalam UTM			Lokasi
	X (m)	Y (m)	Z (m)	
BMM1	696747.540	9208247.809	5.089	Madura
BMM2	696743.606	9208234.102	5.231	Madura
BM1	696389.830	9202843.054	0.779	Surabaya
BM2	696382.045	9202797.810	0.729	Surabaya

Pengukuran titik kontrol dilakukan dalam 2 waktu yang berbeda yakni pada tanggal 19 Maret 2015 dan 7 Mei 2015. Titik kontrol di ambil pada sisi Gresik. Bentang yang diukur adalah bentang 1 (antara *Abutment* Surabaya dan pilar 1) kemudian disebut sebagai arah Surabaya serta bentang ke 100 (antara pilar 99 dan 100) yang kemudian disebut sebagai arah Madura. Jumlah titik yang diukur sebanyak 16 buah di mana posisi titik kontrol dapat dilihat pada Gambar 3.3. Koordinat pengukuran titik kontrol pada tanggal 19 Maret 2015 ditunjukkan pada Tabel 4.10 berikut ini. Sedangkan koordinat titik kontrol selengkapnya pada dua waktu pengukuran dapat dilihat pada Lampiran 9.

Tabel 4.10 Koordinat GCP dari Arah Surabaya pada Pengukuran Tanggal 19 Maret 2015 dalam Sistem Koordinat UTM (Satuan meter)

GCP	Koordinat UTM			Standar Deviasi		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	696392.888	9202859.121	5.166	0.001	0.002	0.003
2	696392.888	9202859.121	5.066	0.001	0.002	0.003
3	696392.920	9202859.129	4.126	0.001	0.002	0.001
4	696392.920	9202859.129	4.026	0.001	0.002	0.001
5	696393.350	9202865.446	5.181	0.002	0.002	0.005
6	696393.350	9202865.446	5.081	0.002	0.002	0.005
7	696393.414	9202865.472	4.129	0.002	0.002	0.005
8	696393.414	9202865.472	4.029	0.002	0.002	0.005
9	696393.643	9202871.386	5.163	0.002	0.002	0.008
10	696393.643	9202871.386	5.063	0.002	0.002	0.008
11	696393.694	9202871.390	4.068	0.002	0.002	0.004
12	696393.694	9202871.390	3.968	0.002	0.002	0.004
13	696393.738	9202872.585	4.606	0.002	0.002	0.004
14	696393.738	9202872.585	4.506	0.002	0.002	0.004
15	696393.798	9202872.590	4.083	0.002	0.002	0.012
16	696393.798	9202872.590	3.983	0.002	0.002	0.012

4.2.2 Hasil Proses Pemotretan Bangunan Jembatan Suramadu

Setelah dilakukan proses pengukuran titik kontrol, maka selanjutnya dilakukan proses pemotretan bangunan Jembatan Suramadu. Pada proses ini pemotretan dilakukan untuk mengambil gambar ujung bangunan Jembatan Suramadu pada sisi Gresik sesuai dengan lokasi GCP pengukuran. Pemotretan dilakukan menggunakan alat kamera DSLR Nikon seri D300 dengan metode pemotretan menggunakan tripod.

Pemotretan ini dilakukan pada waktu yang sama dengan pengukuran titik kontrol yaitu pada tanggal 19 Maret 2015 dan 7 Mei 2015. Fokus yang digunakan pada saat pemotretan sebesar 35 mm. Foto yang dihasilkan sebanyak 12 buah dengan rincian 3 foto di tiap lokasi dan kala pengamatan yang berbeda. Hasil pemotretan bangunan Jembatan Suramadu dapat dilihat pada Gambar 4.5 sampai dengan Gambar 4.8.



Gambar 4.5 Hasil Pemotretan Bangunan Jembatan Suramadu pada Tanggal 19 Maret 2015 Arah Surabaya



Gambar 4.6 Hasil Pemotretan Bangunan Jembatan Suramadu pada Tanggal 19 Maret 2015 Arah Madura



Gambar 4.7 Hasil Pemotretan Bangunan Jembatan Suramadu pada Tanggal 7 Mei 2015 Arah Surabaya



Gambar 4.8 Hasil Pemotretan Bangunan Jembatan Suramadu pada Tanggal 7 Mei 2015 Arah Madura

4.2.3 Hasil Proses Perhitungan Parameter Orientasi Luar Foto Objek Jembatan Suramadu

Sebelum dilakukan proses ortorektifikasi, terlebih dahulu mencari nilai parameter orientasi luar dari foto objek jembatan Suramadu. Foto yang akan digunakan dalam proses ortorektifikasi berjumlah 3 buah pada masing – masing waktu dan tempat pemotretan. Total foto yang akan diortorektifikasi adalah 12 foto.

Parameter orientasi luar dihitung menggunakan rumus kolinieritas pada program MATLAB. Parameter ini terdiri dari posisi dan arah pemotretan foto yang nantinya digunakan dalam proses ortorektifikasi. Nilai parameter orientasi luar foto bentang 1 (arah Surabaya) pada waktu pemotretan 19 Maret 2015 disajikan pada Tabel 4.11. Untuk nilai parameter orientasi luar selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 10.

Tabel 4.11 Parameter Orientasi Luar Foto Bentang 1 (arah Surabaya) pada Pemotretan 19 Maret 2015

EOP	FOTO		
	1	2	3
ω (radian)	0.000	0.000	0.000
ϕ (radian)	0.000	0.000	0.000
κ (radian)	-1.795	-1.766	-1.754
XL (m)	696393.600	696392.500	696392.400
YL (m)	9202866.000	9202861.000	9202861.000
ZL (m)	6.601	5.863	5.737

4.2.4 Hasil Proses Ortorektifikasi

Pada proses ini, ortorektifikasi dilakukan menggunakan program fotogrametri. Program ini memiliki *workflow* untuk membuat suatu foto tegak (ortofoto) baik untuk keperluan fotogrametri maupun fotogrametri jarak dekat. Proses ortorektifikasi bertujuan untuk menghasilkan suatu foto tegak yang terkoreksi dari pergeseran relief (*relief displacement*) (Wolf, 2000).

Metode yang digunakan pada proses ini adalah rektifikasi proyeksi satu foto bereferensi pada datum ketinggian rata-rata menggunakan solusi fotogrametri dan koordinat GCP 3 dimensi (Novak, 1992).

Ortorektifikasi memerlukan berbagai data masukan seperti foto yang akan direktifikasi di mana pada semua foto harus terlihat titik kontrol tanah. Selain itu juga memerlukan keterangan posisi pemotretan kamera, nilai kalibrasi kamera dan data koordinat titik kontrol objek yang difoto.

Perbedaan yang ada pada fotogrametri dan fotogrametri jarak dekat adalah pendefinisian posisi pemotretan terhadap sistem koordinat tanah. Pada fotogrametri, posisi pemotretan dilakukan secara

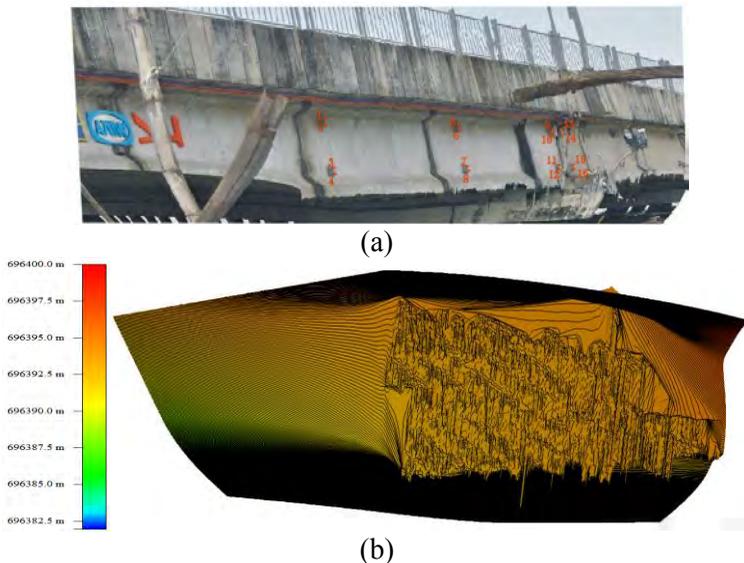
vertikal dari atas tanah sehingga jarak pemotretan berada pada sumbu Z pada sistem koordinat tanah. Sedangkan pada fotogrametri jarak dekat, posisi pemotretan dilakukan secara horizontal terhadap objek sehingga sumbu jarak pemotretan bergantung posisi objek dan kamera. Pada penelitian ini, pemotretan dilakukan di sisi kiri Jembatan Suramadu (membentang arah utara – selatan), maka jarak pemotretan berada pada sumbu X koordinat tanah. Hal ini penting dalam mendefinisikan parameter luar kamera yang mencakup posisi dan orientasi pemotretan dalam proses ortorektifikasi serta mempengaruhi orientasi foto hasil proses ortorektifikasi.

Proses ortorektifikasi pada program meliputi proses definisi model kamera, definisi parameter orientasi luar dan titik kontrol, *alignment photo*, pembentukan *dense surface*, dan pembuatan ortofoto. Proses pertama adalah definisi model kamera (nilai kalibrasi kamera) yang dapat dilakukan secara otomatis oleh program berdasar kaidah *Brown Model* maupun memasukkan nilai secara manual. Proses selanjutnya adalah memasukkan nilai parameter orientasi luar pada masing-masing foto (pada program didefinisikan sebagai kamera) dan menentukan letak serta memasukkan nilai *ground control* pada tiap foto sesuai dengan sistem koordinat yang diinginkan. Selanjutnya melakukan triangulasi udara (*Aerial Triangulation*) dengan prinsip *automatic tie points generation* yang disebut dengan langkah *photo alignment*. Untuk menghasilkan ortofoto maka dilanjutkan dengan merekonstruksi suatu *dense surface* yang memiliki nilai koordinat tanah 2 dimensi dan nilai elevasi yang dapat diekspor

menjadi data *Digital Elevation Model* (DEM) serta menampilkan tektur foto untuk mempermudah interpretasi foto. Ortofoto didapat dengan proses terakhir yaitu *orthophoto generation* dimana ortofoto dapat disimpan dalam berbagai format file seperti format TIFF, JPEG, PNG dan Google KML. Pada program ini, ortofoto yang dihasilkan berupa mosaik ortofoto di mana pembentukan mosaik dilakukan secara otomatis oleh program.

Hasil dari proses ini adalah mosaik foto tegak atau mosaik ortofoto dengan koordinat 2 dimensi serta file DEM foto yang telah berbentuk mosaik atau gabungan dari foto yang bertampalan.

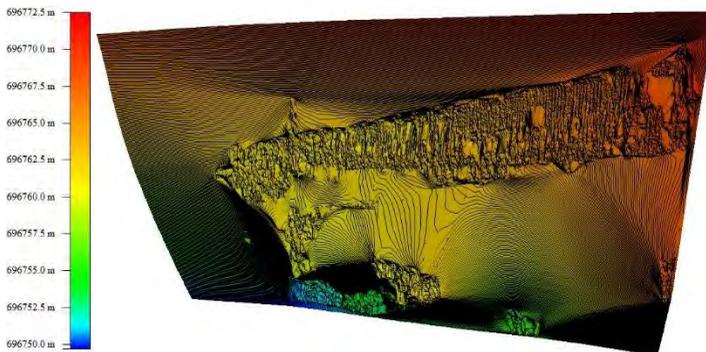
Berikut adalah mosaik ortofoto Jembatan Suramadu arah Surabaya dan foto DEM yang ditunjukkan pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10.



Gambar 4.9 Foto Jembatan Suramadu Sisi Gresik dari Arah Surabaya (a) Ortofoto 2 Dimensi dan (b) Foto Bernilai DEM



(a)



(b)

Gambar 4.10 Foto Jembatan Suramadu Sisi Gresik dari Arah Madura (a) Ortofoto 2 Dimensi dan (b) Foto Bernilai DEM

4.2.5 Analisa Visual Mosaik Ortofoto

Untuk analisa mosaik ortofoto pada arah Surabaya maka perlu menganalisa Gambar 4.9 (b) dan melakukan perbandingan antara Gambar 4.5 dengan Gambar 4.9 (a). Dengan melihat Gambar 4.9

(a) jika dibandingkan dengan Gambar 4.5, maka terdapat perbedaan yang mencolok yaitu :

1. Pada Gambar 4.9 (a) terlihat bahwa segmen / potongan bentang yang ditampilkan lebih panjang. Hal ini dapat dilihat dari jumlah penutup angkur *stressing diafragma* yang ada pada Gambar 4.9 (a) lebih banyak dari jumlah penutup angkur *stressing diafragma* satu foto pada Gambar 4.5. Hal ini dikarenakan, pada Gambar 4.5 merupakan tampilan dari 3 foto bentang pertama saja yang belum melalui proses ortorektifikasi dan pembentukan mosaik. Sedangkan pada Gambar 4.9 (a) merupakan hasil dari proses ortorektifikasi foto dalam bentuk mosaik dari 3 foto yang bertampalan. Gambar 4.9 (a) terlihat mirip dengan foto kedua pada Gambar 4.5. Hasil ini dikarenakan gambar pada mosaik terbentuk dari pencocokan minimal 2 foto di mana objek yang ada pada mosaik ada pada minimal 2 foto yang berbeda. Sedangkan objek yang hanya ada pada salah satu foto, tidak akan dibentuk pada mosaik.
2. Terdapat perbedaan posisi objek pada Gambar 4.5 dan pada Gambar 4.9 (a). Jika pada Gambar 4.5 terlihat objek bertuliskan “WIK A” tertulis urut dari kiri ke kanan sesuai dengan penulisan huruf pada umumnya, maka pada Gambar 4.9 (a) tulisan “WIK A” hurufnya terbalik menjadi menghadap ke kiri. Yang mempengaruhi hasil ini adalah pendefinisian sumbu – sumbu sistem koordinat UTM yang dimasukkan pada proses ortorektifikasi. Pada proses ortorektifikasi ini, pengambilan foto menggunakan metode fotogrametri jarak dekat yaitu pengambilan

foto secara horizontal. Maka, arah pemotretan sama dengan sumbu X pada sistem koordinat tanah (UTM). Sehingga, pendefinisian sumbu kartesian pada sistem koordinat menjadi berubah. Nilai *Easting* berada pada sumbu koordinat Z, nilai *Northing* berada pada sumbu koordinat X dan nilai *Height* berada pada sumbu koordinat Y. Karena nilai *Northing* pada Gambar 4.5 semakin besar jika menjauhi objek bertuliskan “WIK A” dan pembesaran nilai searah dengan penulisan huruf “WIK A”, maka foto menjadi terbalik sesuai dengan pendefinisian sumbu –sumbu sistem koordinat pada program. Pada program, sumbu X didefinisikan sebagai garis horizontal dengan nilai membesar ke arah kanan. Sumbu Y didefinisikan sebagai garis vertikal di mana nilainya semakin besar ke arah atas. Sedangkan sumbu Z didefinisikan sebagai garis proyeksi tegak lurus dari sumbu Y yang memotong bidang yang dibentuk oleh sumbu X dengan nilai membesar ke arah luar (menjauhi pusat sumbu). Sehingga, koordinat mosaik ortofoto pada Gambar 4.9 (a) mengikuti sumbu sistem koordinat program di mana sumbu X menyatakan koordinat *Northing* GCP yang nilainya membesar ke arah kanan dan sumbu Y menyatakan koordinat *Height* GCP yang nilainya membesar ke arah atas.

Dengan melihat Gambar 4.9 (b) sebagai file DEM, dapat dilihat bahwa nilai elevasi/ketinggian mosaik ortofoto sama dengan nilai *Easting* pada koordinat tanah. Hal ini dipengaruhi oleh pendefinisian sistem koordinat tanah di mana pada penelitian ini arah pemotretan sama dengan sumbu

X pada sistem koordinat UTM sehingga nilai jarak pemotretan sama dengan nilai *Easting*. Pada program, nilai *Easting* dimasukkan pada sumbu Z (*Elevation/Height*) sehingga informasinya berubah menjadi ketinggian/elevasi. Pada program ini, ketinggian didefinisikan pada sumbu Z di mana informasi ketinggian didapatkan secara terpisah dalam sebuah file berformat DEM. Sehingga nilai *Easting* pada koordinat tanah didefinisikan sebagai nilai ketinggian pada program dan ditampilkan pada mosaik ortofoto berformat DEM.

Untuk analisa mosaik ortofoto pada arah Madura maka perlu menganalisa Gambar 4.10 (b) dan melakukan perbandingan antara Gambar 4.6 dengan Gambar 4.10 (a). Dengan melihat Gambar 4.10 (a) jika dibandingkan dengan Gambar 4.6, maka terdapat perbedaan yang mencolok yaitu :

1. Pada Gambar 4.10 (a) terlihat bahwa segmen / potongan bentang yang ditampilkan lebih panjang. Hal ini dapat dilihat dari jumlah penutup angkur *stressing diafragma* yang ada pada Gambar 4.10 (a) lebih banyak dari jumlah penutup angkur *stressing diafragma* satu foto pada Gambar 4.6. Hal ini dikarenakan, pada Gambar 4.6 merupakan tampilan dari 3 foto bentang pertama saja yang belum melalui proses ortorektifikasi dan pembentukan mosaik. Sedangkan pada Gambar 4.10 (a) merupakan hasil dari proses ortorektifikasi foto dalam bentuk mosaik dari 3 foto yang bertampalan. Gambar 4.10 (a) terlihat mirip dengan foto kedua pada Gambar 4.6. Hasil ini dikarenakan gambar pada mosaik terbentuk dari pencocokan minimal 2 foto di mana objek yang ada pada mosaik ada pada minimal 2 foto

yang berbeda. Sedangkan objek yang hanya ada pada salah satu foto, tidak akan dibentuk pada mosaik.

2. Terdapat perbedaan posisi objek pada Gambar 4.6 dan pada Gambar 4.10 (a). Jika pada Gambar 4.6 terlihat objek kapal nelayan yang menghadap ke arah kiri, maka pada Gambar 4.10 (a) objek kapal nelayan tersebut terbalik menjadi menghadap ke kanan. Yang mempengaruhi hasil ini adalah pendefinisian sumbu – sumbu sistem koordinat UTM yang dimasukkan pada proses ortorektifikasi. Pada proses ortorektifikasi ini, pengambilan foto menggunakan metode fotogrametri jarak dekat yaitu pengambilan foto secara horizontal. Maka, arah pemotretan sama dengan sumbu X pada sistem koordinat tanah (UTM). Sehingga, pendefinisian sumbu kartesian pada sistem koordinat menjadi berubah. Nilai *Easting* berada pada sumbu koordinat Z, nilai *Northing* berada pada sumbu koordinat X dan nilai *Height* berada pada sumbu koordinat Y. Karena nilai *Northing* pada Gambar 4.6 semakin besar jika menjauhi objek kapal nelayan dan pembesaran nilai searah arah hadap kapal, maka foto menjadi terbalik sesuai dengan pendefinisian sumbu –sumbu sistem koordinat pada program. Pada program, sumbu X didefinisikan sebagai garis horizontal dengan nilai membesar ke arah kanan. Sumbu Y didefinisikan sebagai garis vertikal di mana nilainya semakin besar ke arah atas. Sedangkan sumbu Z didefinisikan sebagai garis proyeksi tegak lurus dari sumbu Y yang memotong bidang yang dibentuk oleh sumbu X dengan

nilai membesar ke arah luar (menjauhi pusat sumbu). Sehingga, koordinat mosaik ortofoto pada Gambar 4.10 (a) mengikuti sumbu sistem koordinat program di mana sumbu X menyatakan koordinat *Northing* GCP yang nilainya membesar ke arah kanan dan sumbu Y menyatakan koordinat *Height* GCP yang nilainya membesar ke arah atas.

Dengan melihat Gambar 4.10 (b) sebagai file DEM, dapat dilihat bahwa nilai elevasi/ketinggian mosaik ortofoto sama dengan nilai *Easting* pada koordinat tanah. Hal ini dipengaruhi oleh pendefinisian sistem koordinat tanah di mana pada penelitian ini arah pemotretan sama dengan sumbu X pada sistem koordinat UTM sehingga nilai jarak pemotretan sama dengan nilai *Easting*. Pada program, nilai *Easting* dimasukkan pada sumbu Z (*Elevation/Height*) sehingga informasinya berubah menjadi ketinggian/elevasi. Pada program ini, ketinggian didefinisikan pada sumbu Z di mana informasi ketinggian didapatkan secara terpisah dalam sebuah file berformat DEM. Sehingga nilai *Easting* pada koordinat tanah didefinisikan sebagai nilai ketinggian pada program dan ditampilkan pada mosaik ortofoto berformat DEM.

4.2.6 RMS Error GCP pada Ortofoto

Koordinat GCP diperlukan dalam proses ortorektifikasi dengan cara menentukan titik GCP pada tiap foto. Tahap ortorektifikasi pada program fotogrametri ini dibutuhkan minimal 2 pasang foto yang berkesesuaian untuk membentuk suatu foto tegak. Pendefinisian GCP harus sesama mungkin antara satu foto dengan foto lainnya. Hal ini akan mempengaruhi nilai kesalahan GCP. Ketentuan

umum yang diikuti saat melakukan *georeferencing* adalah bahwa nilai RMSE foto harus kurang dari sama dengan 1 piksel (Thakur, 2008). Ukuran 1 piksel ini merupakan akurasi foto yang berarti ukuran satu piksel maksimal sama dengan 0.006 mm di foto atau sama dengan 1.8 meter di lapangan (skala foto hasil perhitungan sama dengan 1:300000). Hal tersebut menandakan bahwa nilai kesalahan GCP atau RMSE harus kurang atau sama dengan 1.8 meter di lapangan.

Nilai RMSE foto terkoreksi dalam satuan piksel dan milimeter disajikan pada Tabel 4.12 berikut ini.

Tabel 4.12 Nilai RMSE GCP Ortofoto (Satuan Piksel)

Waktu Pemotretan	Arah Pemotretan			
	Bentang 1 (Surabaya)		Bentang 100 (Madura)	
	RMSE (piksel)	RMSE (mm)	RMSE (piksel)	RMSE (mm)
19 Maret 2015	0.549	0.003	0.585	0.004
7 Mei 2015	0.583	0.003	0.611	0.004

Berdasarkan pada tabel di atas dapat dilihat bahwa semua foto memiliki nilai RMSE kurang dari 1 piksel. Hal ini menandakan bahwa posisi GCP pada pasangan foto masih teliti. 0.549 piksel sama dengan 0.9882 m < 1.800 m. Hasil ini dipengaruhi oleh proses penentuan posisi GCP pada tiap foto. Posisi 1 GCP pada tiga foto diusahakan berada pada lokasi visual yang sama agar nilai kesalahan tiap GCP menjadi kecil.

4.2.7 Koordinat Objek untuk Penentuan Deformasi

Objek yang digunakan untuk penentuan deformasi adalah penutup angkur *stressing diafragma* pada sisi Gresik Jembatan Suramadu dari

arah Surabaya. Terdapat 16 GCP yang akan dihitung deformasinya, terdiri dari 2 sudut pada 8 buah penutup angkur *stressing diafragma*. 6 penutup angkur *stressing diafragma* berada pada bentang 1 dari arah Surabaya yang berdekatan dengan bentang kedua. 2 penutup angkur *stressing diafragma* lainnya berada pada 2 penutup angkur *stressing diafragma* pertama di bentang kedua yang berdekatan dengan bentang pertama. Posisi GCP untuk penentuan deformasi baik di arah Surabaya maupun Madura telah ditampilkan sebelumnya pada Gambar 3.3 (a) dan (b).

Koordinat GCP didapat berdasar mosaik foto tegak yang dapat dari proses ortorektifikasi. Koordinat yang didapat dipengaruhi dari penentuan piksel pada foto. Hal ini dikarenakan tiap satu piksel pada foto mewakili 1.800 meter di lapangan. Dibutuhkan proses perbesaran foto (*zooming*) agar koordinat GCP dapat ditentukan dengan baik sesuai visualisasi GCP pada foto.

Data koordinat GCP objek deformasi dalam sistem koordinat UTM pada arah Surabaya dan Madura dalam satuan meter baik saat pengukuran pertama dan kedua disajikan pada Tabel 4.13. Untuk koordinat objek deformasi selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 11.

Tabel 4.13 Koordinat GCP Objek Deformasi Arah Surabaya dalam Sistem Koordinat UTM Pengukuran 19 Maret 2015

GCP	Koordinat GCP		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	696392.750	9202858.698	6.178
2	696392.813	9202858.739	5.836
3	696392.875	9202859.201	3.571
4	696392.750	9202859.252	3.288
5	696393.188	9202865.886	5.862
6	696393.250	9202865.949	5.583
7	696393.188	9202866.360	3.676
8	696393.250	9202866.451	3.408
9	696393.563	9202870.922	5.563
10	696393.500	9202870.965	5.392
11	696393.438	9202871.324	3.707
12	696393.375	9202871.367	3.511
13	696393.500	9202871.589	5.545
14	696393.313	9202871.615	5.400
15	696393.500	9202872.076	3.707
16	696393.438	9202872.102	3.528

4.2.8 Hasil Proses Perhitungan Vektor Pergeseran

Setelah diketahui koordinat GCP objek pada waktu pengamatan 1 dan 2, kemudian dicari besar vektor pergeserannya baik untuk koordinat *Eeasting*, *Northing* dan *Heightnya*. Hasil perhitungan deformasi resultan dimensi ditunjukkan pada Tabel 4.14 dan Tabel 4.15. Sedangkan visualisasi arah vektor pergeseran jembatan 2 dimensi disajikan pada Lampiran 12.

Tabel 4.14 Besar Deformasi Jembatan Arah Surabaya Secara Horizontal dan Vertikal dalam Sistem Koordinat UTM Satuan Meter

GCP	Horizontal X,Y (m)	Vertikal Z (m)
1	0.009	0.014
2	0.007	0.004
3	0.002	0.011
4	0.009	0.024
5	0.002	0.001
6	0.016	0.001
7	0.001	0.021
8	0.005	0.009
9	0.006	0.000
10	0.008	0.007
11	0.008	0.000
12	0.009	0.035
13	0.003	0.008
14	0.006	0.010
15	0.016	0.019
16	0.009	0.004

Tabel 4.15 Besar Deformasi Jembatan Arah Madura Secara Horizontal dan Vertikal dalam Sistem Koordinat UTM Satuan Meter

GCP	Horizontal X,Y (m)	Vertikal Z (m)
1	0.027	0.006
2	0.027	0.023
3	0.012	0.016
4	0.012	0.008
5	0.024	0.029

Tabel 4.16 Besar Deformasi Jembatan Arah Madura Secara Horizontal dan Vertikal dalam Sistem Koordinat UTM Satuan Meter (lanjutan)

GCP	Horizontal X,Y (m)	Vertikal Z (m)
6	0.041	0.018
7	0.031	0.027
8	0.012	0.027
9	0.036	0.036
10	0.011	0.032
11	0.016	0.029
12	0.021	0.037
13	0.017	0.006
14	0.014	0.032
15	0.055	0.008
16	0.023	0.032

Berdasarkan tabel dan gambar diatas, dapat dilihat bahwa titik GCP bentang baik arah Surabaya (bentang 1 yang berada di antara *Abutment* Surabaya dan pilar 1) maupun arah Madura (bentang 100 yang berada di antara pilar 99 dan 100) mengalami deformasi. Untuk arah Surabaya, deformasi terbesar pada sumbu XY berada pada titik 6 dan 15 sebesar 16 mm dan untuk sumbu Z deformasi terbesar berada pada titik 12 sebesar 35 mm di mana secara spesifik tidak ada perubahan pada koordinat *Easting*. Deformasi terkecil sumbu XY berada pada titik 7 sebesar 1 mm dan deformasi terkecil sumbu Z berada pada titik 11 sebesar 0 mm. Secara visual baik pada sumbu XY maupun Z, vektor pergeseran memiliki tiga warna yang berbeda. Pada sumbu XY, warna hijau menunjukkan pergeseran ke arah utara, warna merah menunjukkan pergeseran ke arah selatan dan warna hitam menunjukkan bahwa titik tidak mengalami

pergeseran. Pada arah Z, warna merah menunjukkan adanya penurunan, warna hijau menunjukkan adanya kenaikan dan warna hitam menunjukkan bahwa titik tidak mengalami pergeseran. Pengamatan pada arah Surabaya menunjukkan bahwa deformasi jembatan cenderung mengarah ke utara dan mengalami penurunan.

Sedangkan pada arah Madura, deformasi terbesar pada sumbu XY berada pada titik 15 sebesar 55 mm dan untuk sumbu Z deformasi terbesar berada pada titik 12 sebesar 37 mm. Deformasi terkecil sumbu XY berada pada titik 10 sebesar 11 mm dan deformasi terkecil sumbu Z berada pada titik 1 dan 13 sebesar 6 mm. Pengamatan pada arah Madura menunjukkan bahwa deformasi jembatan cenderung mengarah ke selatan dan mengalami kenaikan.

4.2.9 Analisa Deteksi Deformasi Objek

Dalam penentuan deformasi objek juga dilakukan pengecekan signifikansi secara statistik dari vektor pergeseran dari hasil estimasi metode ortorektifikasi dengan cara uji hipotesis. Vektor pergeseran 3 dimensi didapat dengan cara menjumlahkan selisih kuadrat koordinat terdeformasi seperti pada persamaan 2.10. Hasil vektor pergeseran tersebut disajikan pada Tabel 4.16. Gambar vektor deformasi 3 dimensi disajikan pada Lampiran 13.

Tabel 4.17 Besar Vektor Pergeseran GCP Jembatan Arah Surabaya dan Madura dalam Satuan Meter

GCP	Arah Surabaya (m)	Arah Madura (m)
1	0.017	0.028
2	0.008	0.035
3	0.011	0.020
4	0.026	0.014
5	0.002	0.038
6	0.016	0.045
7	0.021	0.041
8	0.010	0.030
9	0.006	0.051
10	0.011	0.034
11	0.008	0.033
12	0.036	0.043
13	0.009	0.018
14	0.012	0.035
15	0.025	0.056
16	0.010	0.039
Rata-Rata (X)	0.014	0.035
Standar Deviasi (s)	0.009	0.011
Jumlah Titik (n)	16	16

Hipotesa nol yang digunakan pada uji statistik ini baik pada arah Surabaya maupun arah Madura adalah titik tidak bergeser dalam selang dari kala 1 ke kala 2, sehingga :

Hipotesa nol $H_0 : d = 0$

Hipotesa alternatif $H_1 : d \neq 0$

Statistik yang digunakan untuk uji pergeseran arah Surabaya adalah :

$$T = \frac{\bar{X}}{s/\sqrt{n}} = \frac{0.014}{0.009/\sqrt{16}} = 6.222$$

Sedangkan statistik yang digunakan untuk uji pergeseran arah Madura adalah :

$$T = \frac{X}{s/\sqrt{n}} = \frac{0.035}{0.011/\sqrt{16}} = 12.727$$

Di mana X adalah rata-rata dari d, s adalah standar deviasi dari d, d merupakan vektor pergeseran dan n adalah jumlah sampel pengamatan. Statistik T mempunyai distribusi *t-student* kalau hipotesa nol adalah benar. Selang di mana hipotesa nol ini ditolak adalah

$$T > t_{df, \alpha/2}$$

Di mana df adalah derajat kebebasan (n-1) dan α adalah level signifikan yang digunakan untuk uji statistik. Karena dalam penelitian ini, data pergeseran titik yang diamati berjumlah 16 titik, maka dapat diasumsikan $df = 16 - 1 = 15$. Dalam studi ini, level kepercayaan yang diambil adalah 95% ($\alpha = 5\%$), dimana besar $t_{15, 0.025}$ adalah 2.131.

Pada arah Surabaya, karena $T > t = 6.222 > 2.131$ maka H_0 ditolak. Dan pada arah Madura, karena $T > t = 12.727 > 2.131$ maka H_0 ditolak.

Dari hasil uji hipotesis di atas, diperoleh kesimpulan bahwa pada interval kepercayaan 95% terdapat bukti untuk menyatakan adanya perbedaan antara posisi kala 1 dengan posisi kala 2 tersebut baik pada arah Surabaya maupun pada arah Madura.

4.2.10 Hasil dan Analisa Proses Uji Statistik Validasi Koordinat Mosaik Ortofoto

Sebelum melakukan uji validasi koordinat GCP hasil dari proses ortorektifikasi, terlebih dahulu melakukan uji statistik pada data koordinat GCP yang diambil dari pengukuran *Total Station*. Hal ini dilakukan untuk mengetahui adanya

perbedaan yang signifikan antara pengukuran pertama dan kedua. Uji statistik yang dilakukan adalah uji hipotesa dengan *t-student*. Karena data-data yang akan diuji merupakan data – data yang berpasangan di mana satu data diambil dalam dua waktu yang berbeda, maka metode uji t yang dilakukan berdasarkan selisih data – data yang berpasangan.

Formulasi hipotesa yang dilakukan pada uji statistik koordinat GCP pengukuran *Total Station* kala 1 dan kala 2 adalah sebagai berikut :

Hipotesa nol $H_0 : \mu_{TS1} = \mu_{TS2}$

Hipotesa alternatif $H_1 : \mu_{TS1} \neq \mu_{TS2}$

Di mana asumsi benar adalah tidak terdapat signifikansi data pada pengukuran kala 1 dengan kala 2 pada taraf nyata sebesar 5% ($\alpha = 5\%$). Jumlah titik yang akan diuji sebanyak 16 titik sehingga derajat kebebasan pada pengujian ini sebesar 15 ($df = 16 - 1$).

Statistik yang digunakan untuk uji hipotesa signifikansi koordinat GCP *Total Station* kala 1 dan kala 2 baik pada arah Surabaya dan Madura adalah :

$$T = \frac{\bar{X}}{s/\sqrt{n}}$$

Dimana T adalah nilai t yang dihitung dari standar deviasi, rerata dan akar jumlah titik. X adalah rerata dari koordinat berpasangan. s adalah standar deviasi dari selisih koordinat berpasangan dan n adalah jumlah titik pengamatan (jumlah pasangan titik). Hasil selisih koordinat berpasangan, perhitungan rata – rata selisih koordinat berpasangan, standar deviasi dan nilai t hitung arah Surabaya dan arah Madura ditunjukkan pada Tabel 4.17 dan Tabel 4.18

Tabel 4.18 Besar Selisih Koordinat GCP Hasil Pengukuran Total Station Kala 1 dan Kala 2 Arah Surabaya Sistem Koordinat UTM dalam Satuan

GCP	d		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	0.005	0.014	0.035
2	0.005	0.014	0.035
3	0.037	0.029	0.035
4	0.037	0.029	0.035
5	0.024	0.023	0.038
6	0.024	0.023	0.038
7	0.024	0.019	0.036
8	0.024	0.019	0.036
9	0.020	0.024	0.034
10	0.020	0.024	0.034
11	0.023	0.024	0.035
12	0.023	0.024	0.035
13	0.020	0.021	0.410
14	0.020	0.021	0.410
15	0.029	0.024	0.035
16	0.029	0.024	0.035
Rata - Rata (X)	0.018	0.022	0.020
Standar Deviasi (s)	0.017	0.004	0.152
T hitung (T)	4.149	20.726	0.534

Tabel 4.19 Besar Selisih Koordinat GCP Hasil Pengukuran Total Station Kala 1 dan Kala 2 Arah Madura Sistem Koordinat UTM dalam Satuan Meter

GCP	d		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	0.040	0.006	0.018
2	0.040	0.006	0.018
3	0.036	0.022	0.004
4	0.036	0.022	0.004
5	0.044	0.013	0.026
6	0.044	0.013	0.026
7	0.023	0.007	0.009
8	0.023	0.007	0.009
9	0.024	0.002	0.081
10	0.024	0.002	0.081
11	0.019	0.006	0.060
12	0.019	0.006	0.060
13	0.003	0.006	0.032
14	0.003	0.006	0.032
15	0.004	0.021	0.007
16	0.004	0.021	0.007
Rata - Rata (X)	0.022	0.002	0.030
Standar Deviasi (s)	0.018	0.013	0.027
T hitung (T)	5.039	0.590	4.446

Untuk mengetahui apakah hipotesa nol diterima atau ditolak maka dibutuhkan konsultasi terhadap tabel distribusi *t-student* di mana taraf nyata sebesar 5% dengan metode pencarian berupa *two-taile test* di mana H_0 ditolak jika $T > t_{\alpha/2,df}$ atau $T < -t_{\alpha/2,df}$. Nilai dari tabel distribusi t pada $t_{0.025,15}$ adalah 2.131.

Dengan demikian, pada arah Surabaya, hipotesa nol diterima hanya untuk sumbu Z ($T < t_{\alpha/2,df} = 0.534 < 2.131$) sedangkan hipotesa nol ditolak pada sumbu X ($T > t_{\alpha/2,df} = 4.149 > 2.131$) dan ditolak pada sumbu Y ($T > t_{\alpha/2,df} = 20.726 > 2.131$). Jadi di arah Surabaya, terdapat signifikansi data kordinat GCP pengukuran *Total Station* kala 1 dan kala 2 pada sumbu X dan Y. Sedangkan pada sumbu Z, tidak terdapat signifikansi data.

Pada arah Madura, hipotesa nol diterima hanya untuk sumbu Y ($T < t_{\alpha/2,df} = 0.590 < 2.131$) sedangkan hipotesa nol ditolak pada sumbu X ($T > t_{\alpha/2,df} = 5.039 > 2.131$) dan ditolak pada sumbu Z ($T > t_{\alpha/2,df} = 4.446 > 2.131$). Jadi di arah Madura, terdapat signifikansi data kordinat GCP pengukuran *Total Station* kala 1 dan kala 2 pada sumbu X dan Z. Sedangkan pada sumbu Y, tidak terdapat signifikansi data.

Data koordinat GCP yang didapat melalui foto terortorektifikasi diuji validasinya terhadap koordinat GCP yang diukur secara terestris menggunakan *Total Station*. Hal ini bertujuan untuk mencari signifikansi perbedaan koordinat antara pengukuran ortorektifikasi dengan hasil dari pengukuran terestris dan untuk menguji penerimaan atau penolakan titik hasil ortorektifikasi terhadap titik hasil pengukuran terestris. Uji validasi ini menggunakan uji hipotesis rerata sampel kecil dengan statistik *t-student*. Pada proses ini, parameter yang akan diuji adalah koordinat GCP hasil proses ortorektifikasi. Sedangkan yang menjadi acuan adalah rerata koordinat GCP pengukuran *Total Station* pada kala 1 dan kala 2.

Formulasi hipotesa yang dilakukan pada uji statistik koordinat GCP hasil ortorektifikasi dengan pengukuran terestris adalah sebagai berikut :

Hipotesa nol $H_0 : \mu_{ORTHO} = \mu_{TS}$

Hipotesa alternatif $H_1 : \mu_{ORTHO} \neq \mu_{TS}$

Di mana asumsi benar adalah tidak terdapat signifikansi data hasil ortorektifikasi dengan hasil pengukuran terestris pada taraf nyata sebesar 2% ($\alpha = 2\%$). Karena yang menjadi acuan adalah koordinat GCP hasil pengukuran terestris kala 1 dan kala 2, maka jumlah titik pengamatan sebanyak 2 titik sehingga derajat kebebasan pada pengujian ini sebesar 1 ($df = 2 - 1$).

Statistik yang digunakan untuk uji hipotesa signifikansi koordinat GCP hasil ortorektifikasi dengan hasil terestris baik pada arah Surabaya dan Madura adalah :

$$T = \frac{\mu_{TS} - \mu_{ORTHO}}{s / \sqrt{n}}$$

Dimana T adalah nilai t yang dihitung dari standar deviasi, rerata dan akar jumlah titik. μ_{TS} adalah rerata dari koordinat GCP pengukuran terestris kala 1 dan kala 2. μ_{ORTHO} adalah nilai koordinat hasil ortorektifikasi yang diuji. s adalah standar deviasi dari koordinat GCP terestris kala 1 dan kala 2 dan n adalah jumlah titik pengamatan.

Untuk mengetahui apakah hipotesa nol diterima atau ditolak maka dibutuhkan konsultasi terhadap tabel distribusi *t-student* di mana taraf nyata sebesar 2% dengan metode pencarian berupa *two-tailed test* di mana H_0 ditolak jika $T > t_{\alpha/2, df}$ atau $T < -t_{\alpha/2, df}$. Nilai dari tabel distribusi t pada $t_{0,001,1}$ adalah 31.816.

Sedangkan untuk mengetahui apakah titik koordinat hasil ortorektifikasi berada di dalam

interval kepercayaan 98% atau tidak, dapat diketahui dengan rumus interval kesalahan sebagai berikut :

$$\mu_{TS} - t_{\alpha/2,df} \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu_{ORTHO} < \mu_{TS} + t_{\alpha/2,df} \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Jika koordinat hasil ortorektifikasi berada di antara interval kesalahan minimum dan interval kesalahan maksimum, maka koordinat tersebut berada pada interval kepercayaan 98% dan mendukung diterimanya hipotesa nol.

Hasil uji *t-student* koordinat *Easting* arah Surabaya ditunjukkan pada Tabel 4.19. Hasil uji *t-student* koordinat *Easting*, *Northing* dan *Height* arah Surabaya dan Madura selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 14.

Tabel 4.20 Hasil Uji t- student Koordinat Easting Arah Surabaya dalam Satuan Meter

GCP	Total Station (m)		Ortofoto (m)	Interval Minimum (m)	Interval Maksimum (m)
	19 Maret 2015	07 Mei 2015	19 Maret 2015		
1	696392.888	696392.883	696392.750	696392.801	696392.970
2	696392.888	696392.883	696392.813	696392.801	696392.970
3	696392.920	696392.883	696392.875	696392.307	696393.496
4	696392.920	696392.883	696392.750	696392.307	696393.496
5	696393.350	696393.326	696393.188	696392.958	696393.719
6	696393.350	696393.326	696393.250	696392.958	696393.719
7	696393.414	696393.390	696393.188	696393.022	696393.782
8	696393.414	696393.390	696393.250	696393.022	696393.782
9	696393.643	696393.663	696393.563	696393.334	696393.971
10	696393.643	696393.663	696393.500	696393.334	696393.971
11	696393.694	696393.671	696393.438	696393.317	696394.048
12	696393.694	696393.671	696393.375	696393.317	696394.048
13	696393.738	696393.719	696393.500	696393.417	696394.040
14	696393.738	696393.719	696393.313	696393.417	696394.040
15	696393.798	696393.769	696393.500	696393.320	696394.248
16	696393.798	696393.769	696393.438	696393.320	696394.248

Dengan melihat Tabel 4.19, dapat diketahui bahwa hipotesa nol koordinat ortorektifikasi di arah Surabaya pada koordinat *Easting* ditolak hanya di titik 1 dan 14 karena titik – titik tersebut berada di luar interval minimum dan maksimum. Titik yang memenuhi kriteria uji statistik ditunjukkan dengan tulisan berwarna hitam (contoh : 696392.813), sedangkan titik yang tidak memenuhi kriteria uji statistik ditunjukkan dengan tulisan berwarna merah (contoh : 696392.750). Untuk koordinat *Northing*, hipotesa nol dapat diterima di titik 3, 4, 11, dan 12 saja. Hal ini ditunjukkan dengan nilai koordinat tersebut yang berada di antara interval minimum dan interval maksimum kepercayaan 98%. Untuk koordinat *Height* arah Surabaya, hipotesa nol ditolak hanya di titik 1, 2, 4, 5 dan 8 saja. Hal ini ditunjukkan dengan nilai koordinat *Height* titik tersebut yang berada di luar interval minimum dan maksimum.

Secara umum, koordinat hasil ortorektifikasi di arah Surabaya pada pengukuran 19 Maret 2015, prosentase diterimanya hipotesa nol pada koordinat *Easting*, *Northing*, dan *Height* dari 16 titik GCP secara berturut – turut adalah 87.5%, 25%, dan 56.25%.

Untuk koordinat hasil ortorektifikasi di arah Madura pada pengukuran 19 Maret 2015, dapat dilihat bahwa hipotesa nol koordinat *Easting* ditolak di titik 7, 8, 13, 14, 15 dan 16 yang ditunjukkan dengan nilai koordinat titik tersebut berada di luar interval minimum dan interval maksimum. Untuk koordinat *Northing*, hipotesa nol tidak dapat diterima di titik manapun yang ditunjukkan dengan nilai semua

koordinat berada di luar interval kepercayaan 98%. Dan pada koordinat *Height*, hipotesa nol hanya diterima di titik 10, 11 dan 12 saja. Hal ini ditunjukkan dengan titik – titik tersebut yang berada pada interval kepercayaan 98%. Secara umum, prosentase diterimanya hipotesa nol pada koordinat *Easting*, *Northing*, dan *Height* dari 16 titik GCP hasil ortorektifikasi di arah Madura pada pengukuran 19 Maret 2015 secara berturut – turut adalah 62.5%, 0% dan 18.75%.

Menurut Suharsimi Arikunto (2010), analisis data secara kuantitatif dapat dilakukan dengan menghitung hasil skor yang diperoleh dari rerata nilai yang dianalisa. Pada penelitian ortorektifikasi foto format kecil di bagian validasi koordinat hasil ortorektifikasi, analisa dilakukan terhadap rerata jumlah total titik pada satu arah (koordinat *Easting*, *Northing*, dan *Height*) hasil ortorektifikasi yang menyatakan bahwa hipotesa nol diterima. Di arah Surabaya, total jumlah titik di mana hipotesa nol diterima sebesar 29 buah (14 titik untuk koordinat *Easting*, 4 titik untuk koordinat *Northing* dan 11 titik untuk koordinat *Height*) dengan reratanya terhadap jumlah titik keseluruhan (48 titik) sebesar 0.6042. Di arah Madura, total jumlah titik di mana hipotesa nol diterima sebesar 13 buah (10 titik untuk koordinat *Easting*, 0 titik untuk koordinat *Northing* dan 3 titik untuk koordinat *Height*) dengan reratanya terhadap jumlah titik keseluruhan (48 titik) sebesar 0.2708.

Sedangkan untuk analisis data secara kualitatif menurut Suharsimi Arikunto (2010) dilakukan dengan memanfaatkan prosentase

yang dinyatakan dalam sebuah predikat yang menunjuk pada pernyataan keadaan, ukuran kualitas. Suharsimi Arikunto memasukkan perhitungan prosentase ke dalam lima kategori predikat yaitu sangat baik (81-100%), baik (61-80%), cukup (41-60%), kurang baik (21-40%) dan tidak baik (0-20%). Pada bagian validasi data, analisis kualitatif dilakukan dengan melihat prosentase rerata jumlah total titik pada satu arah yang menyatakan bahwa hipotesa nol diterima di mana analisis menyatakan predikat terhadap diterimanya hipotesa nol. Di arah Surabaya, dengan rerata jumlah total titik yang diterima sebesar 0.6042 maka prosentase rerata jumlah total titik di mana hipotesa nol diterima sebesar 60.42%. Secara kualitatif, rerata jumlah total titik hasil proses ortorektifikasi yang diterima di arah Surabaya cukup untuk menyatakan diterimanya hipotesa nol. Sedangkan di arah Madura, dengan rerata jumlah total titik yang diterima sebesar 0.2708 maka prosentase rerata jumlah total titik di mana hipotesa nol diterima sebesar 27.08%. Secara kualitatif, rerata jumlah total titik hasil proses ortorektifikasi yang diterima di arah Madura kurang baik untuk menyatakan diterimanya hipotesa nol.

Hal ini menunjukkan bahwa di arah Surabaya tidak terdapat signifikansi antara koordinat GCP hasil proses ortorektifikasi terhadap koordinat hasil pengukuran terestris. Dan untuk arah Madura menunjukkan bahwa terdapat signifikansi antara koordinat GCP hasil proses ortorektifikasi terhadap koordinat hasil pengukuran terestris.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian pada tugas akhir ini adalah :

1. Mosaik ortofoto dibentuk secara otomatis oleh program fotogrametri berupa foto dengan sistem koordinat 2 dimensi dan DEM yang dipengaruhi pendefinisian sistem koordinat saat pemotretan dan saat proses ortorektifikasi.
2. Berdasarkan pengamatan sisi Gresik jembatan Suramadu pada tanggal 19 Maret 2015 dan 7 Mei 2015 menggunakan proses ortorektifikasi diketahui bahwa di bentang 1 (antara *Abutment* Surabaya dan pilar 1), deformasi maksimum dalam sistem koordinat UTM untuk sumbu XY sebesar 16 mm dan untuk sumbu Z sebesar 35 mm. Sedangkan di bentang 100 (antara pilar 99 dan 100), deformasi maksimum sumbu XY sebesar 55 mm dan pada sumbu Z sebesar 37 mm.
3. Berdasarkan analisa uji *t-student* koordinat GCP hasil proses ortorektifikasi pengukuran 19 Maret 2015 menunjukkan bahwa prosentase rerata jumlah total titik di mana hipotesa nol diterima di arah Surabaya (bentang 1) sebesar 60.42% sedangkan di arah Madura (bentang 100) sebesar 27.08% yang artinya koordinat GCP hasil proses ortorektifikasi di arah Surabaya tidak memiliki nilai yang signifikan terhadap koordinat hasil pengukuran terestris. Sedangkan di arah Madura terdapat nilai yang signifikan antara koordinat GCP hasil proses ortorektifikasi terhadap koordinat hasil pengukuran terestris.

5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat penulis sampaikan untuk pengembangan lebih lanjut adalah :

1. Untuk mengetahui nilai dan arah deformasi pada jembatan secara lebih teliti maka dibutuhkan pengamatan lebih dari 2 kala.
2. Pada pengukuran GCP secara terestris, lebih baik memilih GCP yang memiliki benang silang sehingga meningkatkan akurasi pembidikan.
3. Pada saat pengukuran terestris, dibutuhkan pengukuran terhadap patok yang bersifat tetap dan telah diketahui koordinatnya agar pengambilan data di waktu berikutnya menjadi mudah.
4. Dalam proses kalibrasi sebaiknya melakukan *bundle adjustment self calibration* di mana titik kontrol pada jembatan Suramadu juga digunakan dalam proses kalibrasi agar hasil kalibrasi lebih baik. Pada penelitian ortorektifikasi foto format kecil ini titik kontrol yang digunakan ada pada bidang *chessboard* bukan pada Jembatan Suramadu dikarenakan tidak adanya penandaan titik kontrol yang tetap di lapangan karena medan yang tidak memungkinkan.
5. Pada proses ortorektifikasi dibutuhkan percobaan lebih dari satu kali agar mendapatkan visualisasi mosaik ortofoto yang paling baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H. Z. 2006. *Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya*. Bandung: PT Pradnya Paramita.
- Ahmad, A. 1994. Small Format Photography for Architectural Photogrammetry : A Review. *Buletin Ukur*, hal. 42-52.
- Andreas, H. 2001. Analisis Deformasi Gunung Api Papandayan Memanfaatkan Parameter Baseline Hasil Survey GPS. *Tugas Akhir Sarjana. Departemen Teknik Geodesi ITB Bandung*.
- Anjasmara, I. M. 2005. *Sistem Tinggi*. Surabaya: DIKLAT Teknik Pengukuran dan Pemetaan Kota Surabaya.
- Arikunto, S. 2010. *Prosedur Penelitian Suatu Pendekatan Praktik*. Jakarta: PT. Rineka Cipta.
- Atkinson. 1980. *Developments in Close Range Photogrammetry- I*. London: Applied Science Publishers.
- Atkinson, K. B. 1996. *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Scotland: Whittles Publishing.
- Berlin, A. T. 1992. *Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation 5th Edition*. New Jersey: Prentice Hall.
- BPWS. 2011. *Badan Pengembangan Wilayah Surabaya Madura*. Dipetik 11, 2015, dari www.bpws.go.id
- Dipokusumo. 1999. *Pengantar Fotogrametri*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Effendi, F. 2000. *Close Range Photogrammetry Untuk Pemantauan Deformasi*. Bandung: Departemen Teknik Geodesi ITB.
- Elviani, L. E. 2014. *Penentuan Deformasi Dengan Teknik Fotogrametri Jarak Dekat*. Surabaya: ITS.
- Emilio, A. 2005. Pemanfaatan INSAR untuk Studi Deformasi Permukaan Bumi, Studi Kasus Southern California. *Tugas Akhir Sarjana. Departemen Teknik Geodesi ITB Bandung*.
- Featherstone, W. E. 2006. *Height Systems and Vertical Datums : A Review In The Australian Context*.

- Fraser, C. S. 1997. Digital camera self-calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52(4) : 149-159.
- Fryer, J. d. 1994. On the Accuracy of Heighting from Aerial Photographs and Maps: Implication to Processmodellers. *Earth Surface Processes and Landforms. Vol.19*, 577-583.
- Fryer, J. G. 1989. Camera Calibration in Non Topographic Photogrammetry. *Non-Topographic Photogrammetry. ASPRS*, 59-69.
- Geogopoulos, A. S. 1992. FOTOCAD : A Simple Photogrammetric Package for Non-Photogrammetists. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 357-362.
- Hampel, H. G. 2006. Photogrammetric Techniques in Civil Engineering Material Testing and Structure Monitoring. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 72*, 39-45.
- Hanifa, N. R. 2007. *Studi Penggunaan Kamera Digital Low-Cost Non-Metric Auto-Focus untuk Pemantauan Deformasi*. Bandung: Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika ITB.
- Hugemann, W. 2010. Correcting Lens Distortions in Digital Photographs. *EVU Journal*.
- Jiang, R. 2005. Development of Digital Photogrammetric System for Bridge Deflection Measurement. *Disertasi New Mexico State University : Meksiko*.
- Karara, H. M. 1989. *Instrumentation for Non-Topographic Photogrammetry*. Virginia: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- KementerianPU. 2012. Diambil kembali dari Loker Pelayanan Informasi Peta Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia: www.loketpeta.pu.go.id
- Kuang, S. 1996. *Geodetic Network Analysis and Optimal Design: Concepts and Applications*. Ann Arbor Press.

- Kusnandar, A. 2004. Studi Karakteristik Deformasi Gunung Api Papandayan Sebelum Letusan dan Setelah Letusan November 2002. *Skripsi Sarjana Departemen Teknik Geodesi ITB Bandung*.
- Leitch, K. 2002. *Close Range Photogrammetric Measurement of Bridge Deformation*. Meksiko: New Mexico State University.
- Muntohar A S, d. B. 2007. *Jembatan*. Yogyakarta: Beta Offset.
- Nirwana. 2003. Penentuan Kecepatan dan Percepatan Penurunan Tinggi Titik dari Pengukuran Jaring Sipat Datar Lima Kala dalam Lingkup Studi Penurunan Muka Tanah. *Tugas Akhir Sarjana. Departemen Teknik Geodesi ITB. Bandung*.
- Novak, K. 1992. *rectification of Digital Imagery, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*.
- Puspita, B. D. 2007. *Estimasi Sedimen Lahar Dingin di Sebagian Kali Gendol Gunung Merapi Menggunakan FUFK dan LIDAR*.
- Sarsito, D. A. 2007. *Studi Deformasi Secara Geometrik: Pengukuran, Pengolahan Data dan Analisis*.
- Sugiyono. 2006. *Statistik untuk Penelitian*. Bandung: CV Alfabeta.
- Supadiningsih, C. N. 2004. *Modul Ajar Ilmu Ukur Tanah I*. Surabaya: Program Studi Teknik Geodesi-ITS.
- Thakur, S. A. 2008. Orthorectification of IRS-P6 LISS-IV data using Landsat ETM and SRTM datasets in the Himalayas of Chamoli District, Uttarakhand. *Current Science*, 1459.
- Tjahjadi, M. E. 2013. *Pemantauan Deformasi Jalan Layang dan Jembatan Kereta Api dengan Kamera Dijital di Kota Malang*. Jurnal Soundir Program Studi Teknik Sipil Institut Teknologi Nasional, Malang.
- Veress, S. A. 1981. Photogrammetry for Dimensional Control of Bridges. *Photogrammetria*, 193-202.
- W S Warner, R. W. 1996. Small Format Aerial Photogrammetry. *ASPRS*, 348.
- Wales, Jimmy. 10 Januari 2001. *Wikipedia*. www.wikipedia.co.id. (diakses 10 Oktober 2014).

- Wigrata, H. 1986. *Kalibrasi Besaran - besaran Panjang Fokus dan Distorsi Lensa pada Kamera Non - Metrik*. Bandung: Departemen Teknik Geodesi ITB.
- Wolf P R, D. B. 2000. *Elements of Photogrammetry with Application in GIS*. New York AS: Mc Graw-Hill Book Company.
- Wolf, P. R. 1983. *Elements of Photogrammetry*. New York USA: McGraw-Hill Book Company.
- Wolf, P. R. 1993. *Element of Photogrammetry, Dengan Interpretasi Foto Udara dan Penginderaan Jauh*. Gadjah Mada University Press.
- Yang, X. 2000. Accuracy of rational function approximation in photogrammetry . *ASPRS Annual Conference*, 22 - 26.

Lampiran 1

SPEKIFIKASI KAMERA DSLR NIKON D3000



Effective Pixels	:	10 megapixels, 11 megapixels sensor photo detectors
Image Sensor	:	CCD sensor, APS-C (23.6 x 15.8 mm) sensor size
Image Size (pixels)	:	Max resolution 3872 x 2592, other resolution 2896 x 1944 and 1936 x 1296, 3:2 image ratio
Sensitivity	:	ISO (Auto, 100, 200, 400, 800, 1600 plus 3200 with boost), 12 white balance presets, RAW uncompressed format, JPEG quality levels (fine, normal, basic)
Storage Media	:	SD / SDHC card
Monitor	:	3" screen size, 230000 screen dots, 95% viewfinder coverage, 0.8x viewfinder magnification
Exposure Metering	:	Multi, center-weighted, spot

Exposure Modes	:	30 sec minimum shutter speed, 1/4000 sec maximum shutter speed, aperture priority, shutter priority, manual exposure mode, subject/scene modes, built-in flash (pop-up), 12.00 m (at ISO 100) flash range, external flash, (Auto, on, off, red-eye, slow sync, rear curtain) flash modes, 3.0 fps continuous drive, (2, 5, 10 or 20 sec) self-timer, (± 5 at 1/3 EV, $\frac{1}{2}$ EV steps) exposure compensation
Interface	:	USB 2.0 (480 Mbit/sec), Eye-Fi wireless connected, Optional ML-L3 remote control
Power Sources	:	Battery pack, Lithium-Ion EN-EL9a rechargeable battery and charger, battery life 500 CIPA
Dimensions (W x H x D)	:	126 x 97 x 64 mm (4.96 x 3.82 x 2.52")
Weight	:	536 g (1.18 lb / 18.91 oz) inc. battery

Lampiran 2

Tabel Koordinat GCP Bidang Kalibrasi 9 Foto (satuan Piksel) dalam Sistem Koordinat Piksel

TIK	FOTO																	
	1		2		3		4		5		6		7		8		9	
	U	V	U	V	U	V	U	V	U	V	U	V	U	V	U	V	U	V
1	585	2149	665	2073	763	2119	487	2051	567	1922	594	2005	710	2073	977	2134	683	2157
2	1638	2157	1647	2104	1789	2096	1736	2058	1664	1975	1861	1998	1763	2089	1905	2157	1727	2111
3	1994	2157	1986	2119	2110	2089	2146	2058	2066	1990	2262	1998	2102	2096	2218	2164	2048	2104
4	3056	2164	3029	2149	3074	2066	3386	2058	3324	2043	3404	1975	3163	2111	3252	2187	2985	2081
5	1290	1793	1308	1763	1459	1770	1334	1679	1361	1611	1432	1634	1406	1785	1557	1854	1397	1831
6	2360	1801	2334	1778	2441	1755	2539	1672	2494	1641	2592	1626	2476	1793	2539	1869	2405	1800
7	585	1444	665	1406	763	1437	576	1323	728	1262	629	1270	647	1459	879	1543	674	1528
8	1647	1444	1655	1422	1789	1429	1745	1323	1780	1285	1807	1285	1754	1467	1834	1543	1771	1520
9	2003	1444	1986	1437	2110	1429	2119	1331	2146	1285	2173	1293	2110	1475	2182	1550	2110	1513
10	3065	1452	3038	1452	3065	1414	3279	1331	3315	1300	3252	1308	3235	1482	3252	1550	3092	1505
11	576	1088	656	1073	754	1088	612	990	808	967	638	936	621	1111	835	1232	674	1187
12	1647	1088	1655	1088	1789	1088	1745	997	1825	959	1780	967	1736	1126	1798	1225	1798	1187
13	2003	1088	2003	1088	2119	1088	2119	997	2182	959	2146	974	2119	1126	2146	1217	2155	1194
14	3065	1088	3038	1096	3074	1088	3226	1005	3324	959	3181	990	3261	1141	3235	1209	3154	1187
15	1290	732	1316	739	1441	747	1388	686	1531	679	1388	656	1343	762	1424	899	1441	846
16	2360	739	2342	747	2441	762	2476	686	2574	656	2449	686	2521	777	2485	868	2548	861
17	585	376	665	406	763	398	692	398	951	421	665	353	540	383	728	580	683	459
18	1647	376	1655	406	1789	414	1745	398	1914	398	1736	391	1727	383	1727	535	1861	482
19	2003	376	1994	398	2128	421	2102	398	2253	391	2075	398	2137	391	2093	520	2235	505
20	3065	383	3038	398	3074	436	3145	414	3324	361	3047	436	3342	391	3226	474	3279	527

Lampiran 3

Tabel Titik GCP 9 Foto dalam Sistem Koordinat Foto (Satuan mm) Hasil Transformasi Koordinat

TITIK	FOTO							
	1		2		3		4	
	X (mm)	Y (mm)						
1	-8.231	-5.203	-7.744	-4.739	-7.146	-5.020	-8.829	-4.605
2	-1.813	-5.251	-1.758	-4.928	-0.893	-4.880	-1.216	-4.648
3	0.357	-5.251	0.308	-5.020	1.064	-4.837	1.283	-4.648
4	6.830	-5.294	6.665	-5.203	6.939	-4.697	8.841	-4.648
5	-3.934	-3.033	-3.825	-2.850	-2.904	-2.892	-3.666	-2.338
6	2.587	-3.081	2.429	-2.941	3.081	-2.801	3.678	-2.295
7	-8.231	-0.905	-7.744	-0.674	-7.146	-0.863	-8.286	-0.168
8	-1.758	-0.905	-1.710	-0.771	-0.893	-0.814	-1.161	-0.168
9	0.411	-0.905	0.308	-0.863	1.064	-0.814	1.118	-0.216
10	6.884	-0.954	6.720	-0.954	6.884	-0.722	8.189	-0.216
11	-8.286	1.265	-7.799	1.356	-7.201	1.265	-8.067	1.862
12	-1.758	1.265	-1.710	1.265	-0.893	1.265	-1.161	1.820
13	0.411	1.265	0.411	1.265	1.118	1.265	1.118	1.820
14	6.884	1.265	6.720	1.216	6.939	1.265	7.866	1.771
15	-3.934	3.435	-3.776	3.392	-3.014	3.344	-3.337	3.715
16	2.587	3.392	2.478	3.344	3.081	3.252	3.294	3.715
17	-8.231	5.605	-7.744	5.422	-7.146	5.471	-7.579	5.471
18	-1.758	5.605	-1.710	5.422	-0.893	5.373	-1.161	5.471
19	0.411	5.605	0.357	5.471	1.173	5.331	1.015	5.471
20	6.884	5.562	6.720	5.471	6.939	5.239	7.372	5.373

Tabel Titik GCP 9 Foto dalam Sistem Koordinat Foto (Satuan mm) Hasil Transformasi Koordinat (lanjutan)

TITIK	FOTO									
	5		6		7		8		9	
	X (mm)	Y (mm)								
1	-8.341	-3.819	-8.177	-4.325	-7.470	-4.739	-5.842	-5.111	-7.634	-5.251
2	-1.655	-4.142	-0.454	-4.282	-1.051	-4.837	-0.186	-5.251	-1.271	-4.971
3	0.795	-4.233	1.990	-4.282	1.015	-4.880	1.722	-5.294	0.686	-4.928
4	8.463	-4.557	8.951	-4.142	7.482	-4.971	8.024	-5.434	6.397	-4.788
5	-3.502	-1.923	-3.069	-2.063	-3.227	-2.984	-2.307	-3.404	-3.282	-3.264
6	3.404	-2.106	4.001	-2.015	3.294	-3.033	3.678	-3.496	2.862	-3.075
7	-7.360	0.204	-7.963	0.155	-7.854	-0.997	-6.439	-1.509	-7.689	-1.417
8	-0.948	0.064	-0.783	0.064	-1.106	-1.045	-0.619	-1.509	-1.003	-1.369
9	1.283	0.064	1.448	0.015	1.064	-1.094	1.502	-1.551	1.064	-1.326
10	8.408	-0.027	8.024	-0.076	7.921	-1.137	8.024	-1.551	7.049	-1.277
11	-6.872	2.002	-7.908	2.191	-8.012	1.125	-6.708	0.387	-7.689	0.661
12	-0.674	2.051	-0.948	2.002	-1.216	1.033	-0.838	0.430	-0.838	0.661
13	1.502	2.051	1.283	1.960	1.118	1.033	1.283	0.479	1.338	0.619
14	8.463	2.051	7.591	1.862	8.079	0.942	7.921	0.527	7.427	0.661
15	-2.465	3.758	-3.337	3.898	-3.611	3.252	-3.118	2.417	-3.014	2.740
16	3.892	3.898	3.130	3.715	3.569	3.161	3.349	2.606	3.733	2.649
17	-6.001	5.331	-7.744	5.745	-8.506	5.562	-7.360	4.362	-7.634	5.099
18	-0.131	5.471	-1.216	5.514	-1.271	5.562	-1.271	4.636	-0.454	4.959
19	1.935	5.514	0.850	5.471	1.228	5.514	0.960	4.727	1.826	4.819
20	8.463	5.696	6.775	5.239	8.573	5.514	7.866	5.008	8.189	4.685

Lampiran 4

Tabel Parameter Orientasi Luar 9 Foto

EOP	FOTO								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ω (radian)	-0.008	-0.031	-0.025	0.505	-0.522	0.533	-0.430	-0.352	-0.438
ϕ (radian)	0.003	0.115	-0.157	-0.025	-0.222	-0.177	0.026	0.238	-0.218
κ (radian)	0.003	0.013	-0.004	0.003	-0.012	0.011	0.010	-0.009	-0.003
XL (mm)	108.452	161.257	21.225	87.834	189.918	19.599	109.325	202.702	-1.011
YL (mm)	71.341	81.605	78.654	-143.344	-152.030	-155.213	249.530	231.474	260.251
ZL (mm)	452.983	465.686	474.441	365.025	359.683	356.892	390.865	418.846	395.543

Lampiran 5

Tabel Nilai Selisih Parameter Orientasi Dalam 9 Foto Setiap Iterasi

ITERASI	IOP							
	x0 (mm)	y0 (mm)	f (mm)	k1 (mm)	k2 (mm)	k3 (mm)	p1 (mm)	p2 (mm)
1	2.282E+00	7.000E-03	-1.330E-04	7.600E-07	1.741E-04	1.112E-04	5.970E-02	1.743E-05
2	1.244E+00	-7.500E-03	1.329E-04	-7.600E-07	2.000E-03	5.300E-03	8.190E-02	-1.670E-01
3	-1.582E+01	1.780E-04	6.300E-07	0.000E+00	-1.900E-03	-5.400E-03	-1.813E-01	2.283E-01
4	1.280E+01	-3.744E-04	1.580E-06	0.000E+00	7.903E-04	1.300E-03	4.220E-02	-9.040E-02
5	-1.926E+00	5.564E-04	-6.000E-08	0.000E+00	-2.000E-03	-2.800E-03	-2.450E-02	6.030E-02
6	2.242E+00	2.323E-04	-4.350E-06	2.000E-08	6.259E-04	1.700E-03	3.080E-02	-3.850E-02
7	-3.969E-01	-5.143E-05	2.000E-07	0.000E+00	1.884E-04	-2.587E-04	-1.010E-02	6.600E-03
8	8.410E-02	9.891E-05	-1.230E-06	0.000E+00	-7.975E-05	1.084E-05	2.523E-04	-9.349E-04
9	-2.690E-02	-3.766E-05	3.600E-07	0.000E+00	5.412E-05	-1.809E-05	2.906E-05	2.779E-05
10	3.800E-02	5.360E-05	-7.300E-07	0.000E+00	-3.129E-05	7.170E-06	1.006E-05	-1.785E-05
11	-1.540E-02	-2.299E-05	2.500E-07	0.000E+00	2.458E-05	-9.710E-06	1.263E-05	9.450E-06
12	1.860E-02	2.607E-05	-3.400E-07	0.000E+00	-1.626E-05	4.390E-06	-4.030E-06	-2.530E-06

Lampiran 6

Tabel Nilai *Reprojection Error* 9 Foto (Satuan mm)

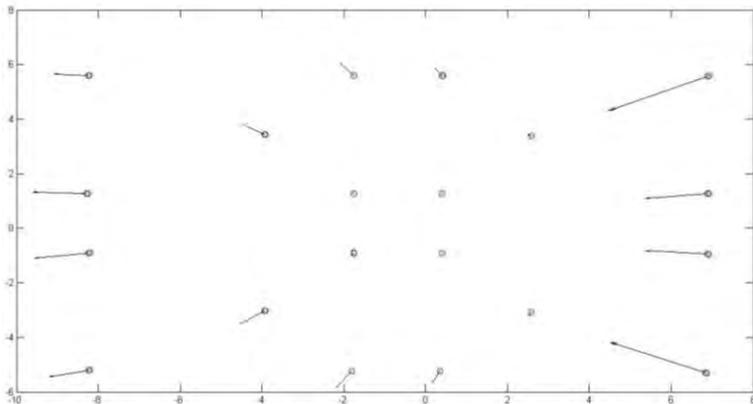
TITIK	FOTO									
	1		2		3		4		5	
	X (mm)	Y (mm)								
1	-0.019	-0.005	-0.019	-0.006	-0.019	-0.007	-0.021	-0.005	-0.021	-0.006
2	-0.007	-0.012	-0.007	-0.011	-0.005	-0.010	-0.005	-0.010	-0.005	-0.009
3	-0.004	-0.008	-0.003	-0.008	-0.003	-0.006	-0.002	-0.006	-0.002	-0.006
4	-0.045	0.022	-0.043	0.021	-0.045	0.019	-0.049	0.014	-0.054	0.018
5	-0.012	-0.009	-0.011	-0.009	-0.007	-0.007	-0.010	-0.007	-0.008	-0.005
6	-0.001	-0.003	-0.001	-0.003	-0.002	-0.002	-0.003	-0.001	-0.002	-0.001
7	-0.026	-0.004	-0.027	-0.004	-0.026	-0.004	-0.027	-0.002	-0.027	-0.001
8	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	-0.001	0.000	-0.001	0.000
10	-0.030	0.003	-0.027	0.002	-0.029	0.002	-0.052	0.001	-0.056	0.000
11	-0.026	0.001	-0.026	0.002	-0.026	0.002	-0.026	0.003	-0.025	0.004
12	-0.001	0.001	-0.001	0.001	0.000	0.000	-0.001	0.001	0.000	0.001
13	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	-0.001	0.000	-0.001	0.000
14	-0.030	-0.003	-0.027	-0.003	-0.031	-0.004	-0.048	-0.007	-0.059	-0.010
15	-0.011	0.007	-0.010	0.007	-0.007	0.006	-0.009	0.007	-0.006	0.006
16	-0.002	0.001	-0.002	0.001	-0.003	0.001	-0.004	0.000	-0.006	-0.001
17	-0.016	0.001	-0.017	0.002	-0.017	0.004	-0.017	0.003	-0.018	0.008
18	-0.006	0.009	-0.006	0.008	-0.004	0.007	-0.005	0.008	-0.004	0.006
19	-0.003	0.005	-0.003	0.005	-0.003	0.004	-0.003	0.004	-0.004	0.002
20	-0.047	-0.024	-0.045	-0.023	-0.047	-0.023	-0.052	-0.025	-0.053	-0.022

Tabel Nilai *Reprojection Error* 9 Foto (Satuan mm)
(lanjutan)

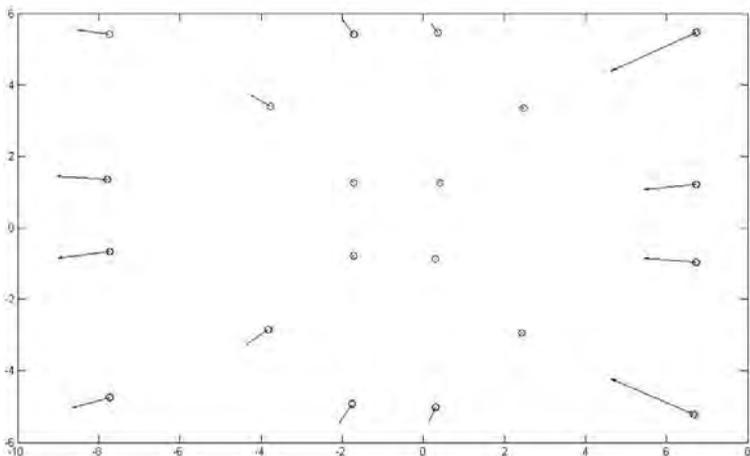
TITIK	FOTO							
	6		7		8		9	
	X (mm)	Y (mm)						
1	-0.020	-0.006	-0.019	-0.007	-0.018	-0.011	-0.018	-0.006
2	-0.003	-0.008	-0.005	-0.010	-0.004	-0.009	-0.006	-0.011
3	-0.002	-0.004	-0.003	-0.006	-0.004	-0.004	-0.003	-0.007
4	-0.053	0.015	-0.051	0.022	-0.050	0.020	-0.038	0.017
5	-0.006	-0.005	-0.009	-0.008	-0.006	-0.008	-0.009	-0.009
6	-0.004	-0.001	-0.003	-0.002	-0.005	-0.001	-0.002	-0.002
7	-0.027	-0.001	-0.027	-0.004	-0.024	-0.006	-0.026	-0.005
8	0.000	0.000	-0.001	-0.001	0.000	-0.001	-0.001	-0.001
9	-0.001	0.000	-0.001	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	0.000
10	-0.049	0.001	-0.048	0.005	-0.051	0.007	-0.033	0.004
11	-0.025	0.003	-0.026	0.001	-0.025	0.000	-0.027	0.000
12	-0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13	-0.001	0.000	-0.001	0.000	-0.001	0.000	-0.001	0.000
14	-0.043	-0.007	-0.051	-0.004	-0.048	-0.002	-0.038	-0.002
15	-0.009	0.008	-0.009	0.007	-0.006	0.004	-0.006	0.004
16	-0.003	0.001	-0.004	0.000	-0.003	0.000	-0.004	0.000
17	-0.016	0.002	-0.017	0.001	-0.021	0.006	-0.018	0.004
18	-0.005	0.008	-0.005	0.008	-0.004	0.007	-0.003	0.006
19	-0.003	0.004	-0.003	0.003	-0.002	0.004	-0.003	0.003
20	-0.044	-0.022	-0.054	-0.022	-0.056	-0.024	-0.059	-0.023

Lampiran 7

Visualisasi Kesalahan Koordinat Foto Awal dan Koordinat Terkoreksi Foto 1



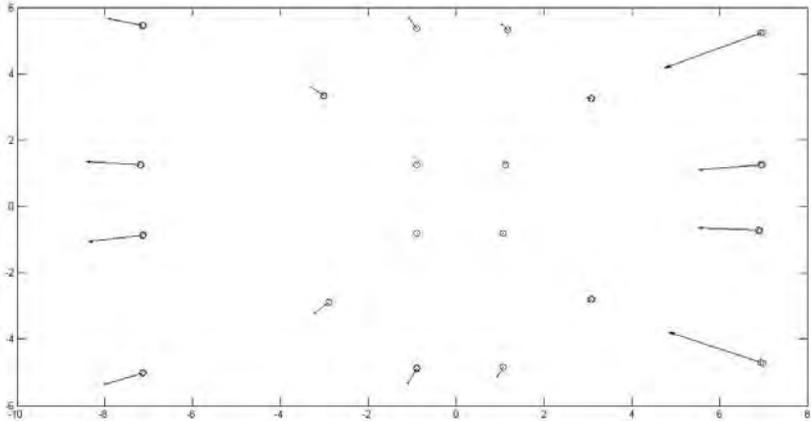
Visualisasi Kesalahan Koordinat Foto Awal dan Koordinat Terkoreksi Foto 2



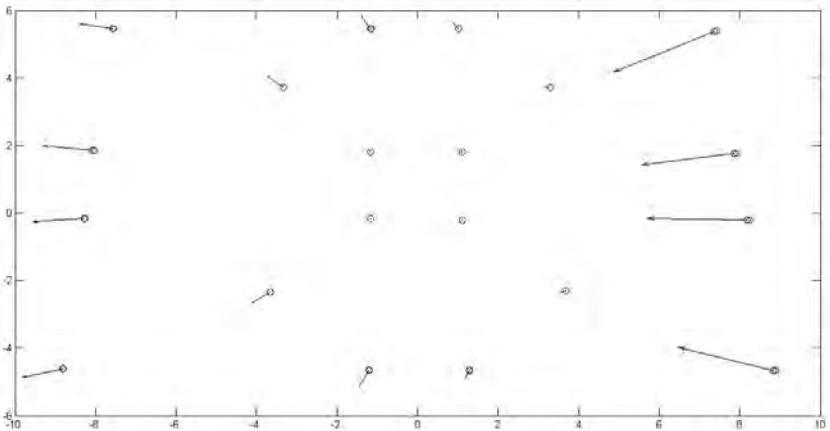
Keterangan :

●: GCP awal, ●: GCP terkoreksi

Visualisasi Kesalahan Koordinat Foto Awal dan Koordinat Terkoreksi Foto 3



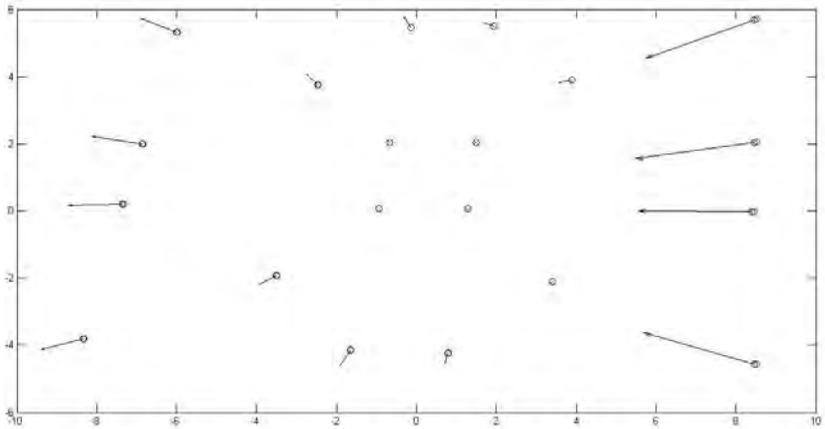
Visualisasi Kesalahan Koordinat Foto Awal dan Koordinat Terkoreksi Foto 4



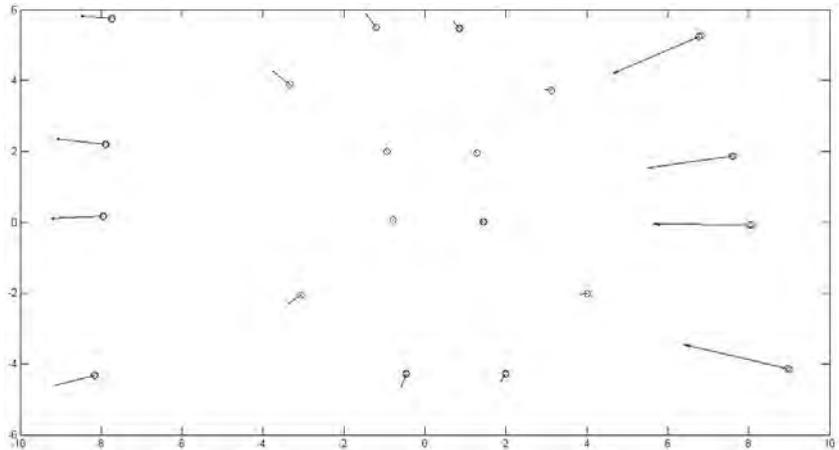
Keterangan :

○: GCP awal, ○: GCP terkoreksi

Visualisasi Kesalahan Koordinat Foto Awal dan Koordinat Terkoreksi Foto 5



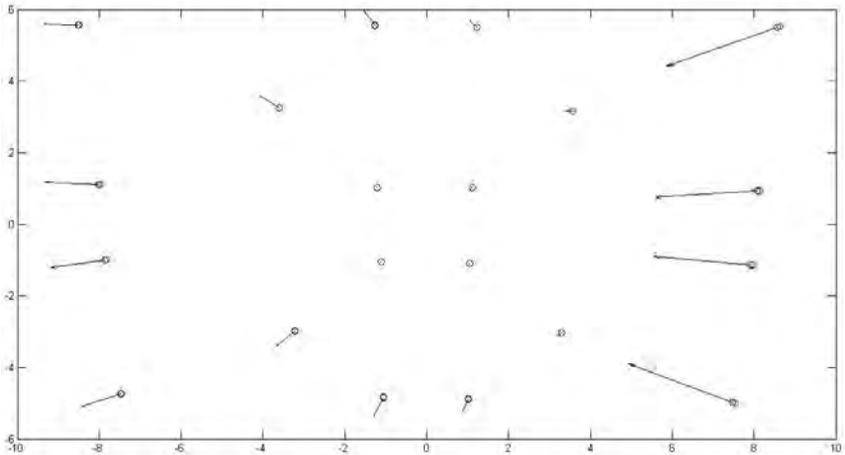
Visualisasi Kesalahan Koordinat Foto Awal dan Koordinat Terkoreksi Foto 6



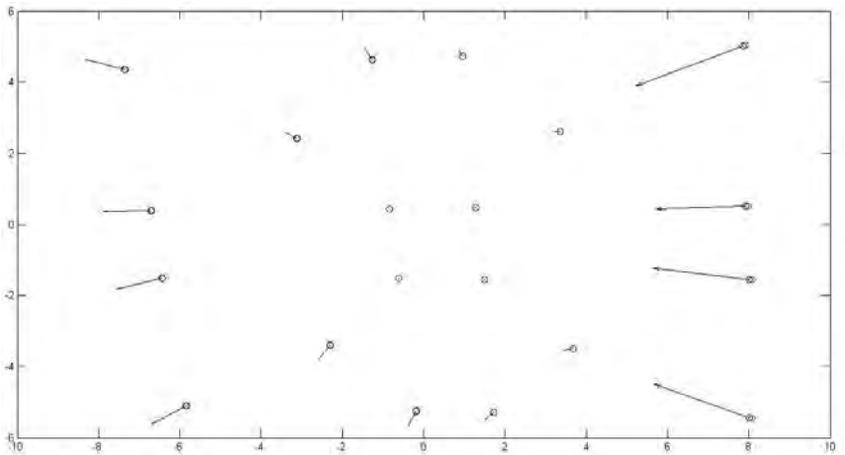
Keterangan :

○: GCP awal, ○: GCP terkoreksi

Visualisasi Kesalahan Koordinat Foto Awal dan Koordinat
Terkoreksi Foto 7



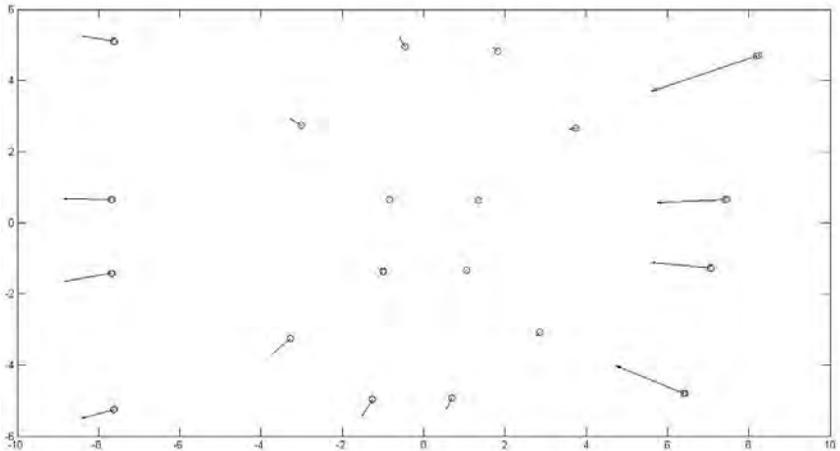
Visualisasi Kesalahan Koordinat Foto Awal dan Koordinat
Terkoreksi Foto 8



Keterangan :

○: GCP awal, ○: GCP terkoreksi

Visualisasi Kesalahan Koordinat Foto Awal dan Koordinat Terkoreksi Foto 9



Keterangan :

○: GCP awal, ○: GCP terkoreksi

Lampiran 8

Tabel Nilai Kesalahan Radial 9 Foto (Satuan mm)

Titik	FOTO 1		FOTO 2		FOTO 3		FOTO 4		FOTO 5	
	x (mm)	y (mm)								
1	-0.014	-0.010	-0.010	-0.007	-0.007	-0.006	-0.016	-0.010	-0.011	-0.009
2	0.002	0.008	0.002	0.008	0.000	0.008	0.001	0.008	0.001	0.008
3	-0.002	0.008	-0.002	0.008	-0.003	0.008	-0.003	0.008	-0.002	0.008
4	0.015	-0.011	0.014	-0.010	0.014	-0.009	0.003	-0.002	0.011	-0.008
5	0.005	0.005	0.005	0.005	0.003	0.005	0.004	0.004	0.004	0.006
6	-0.005	0.006	-0.005	0.005	-0.006	0.005	-0.007	0.004	-0.006	0.006
7	-0.001	0.000	0.003	0.000	0.006	0.001	-0.001	0.000	0.002	0.001
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
9	0.000	0.001	0.000	0.000	-0.001	0.001	-0.001	0.000	-0.001	0.001
10	0.002	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.015	-0.001	0.004	-0.001
11	-0.001	0.000	0.003	0.000	0.006	-0.001	0.000	0.000	0.004	0.000
12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000
13	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000
14	0.002	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.012	0.002	0.007	0.000
15	0.005	-0.005	0.005	-0.005	0.003	-0.004	0.004	-0.005	0.003	-0.003
16	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.006	-0.005	-0.006	-0.005	-0.007	-0.004
17	-0.014	0.010	-0.010	0.007	-0.006	0.005	-0.009	0.007	-0.007	0.005
18	0.002	-0.008	0.002	-0.008	0.000	-0.008	0.001	-0.008	0.000	-0.007
19	-0.002	-0.008	-0.002	-0.008	-0.003	-0.008	-0.003	-0.008	-0.004	-0.007
20	0.014	0.010	0.013	0.009	0.014	0.009	0.016	0.010	0.017	0.008

Lampiran 9

Tabel Koordinat GCP dari Arah Surabaya pada Pengukuran Tanggal 19 Maret 2015 dalam Sistem Koordinat UTM (Satuan meter)

GCP	Koordinat UTM			Standar Deviasi		
	Easting (m)	Northing (m)	Height (m)	E (m)	N (m)	H (m)
1	696392.888	9202859.121	5.166	0.001	0.002	0.003
2	696392.888	9202859.121	5.066	0.001	0.002	0.003
3	696392.920	9202859.129	4.126	0.001	0.002	0.001
4	696392.920	9202859.129	4.026	0.001	0.002	0.001
5	696393.350	9202865.446	5.181	0.002	0.002	0.005
6	696393.350	9202865.446	5.081	0.002	0.002	0.005
7	696393.414	9202865.472	4.129	0.002	0.002	0.005
8	696393.414	9202865.472	4.029	0.002	0.002	0.005
9	696393.643	9202871.386	5.163	0.002	0.002	0.008
10	696393.643	9202871.386	5.063	0.002	0.002	0.008
11	696393.694	9202871.390	4.068	0.002	0.002	0.004
12	696393.694	9202871.390	3.968	0.002	0.002	0.004
13	696393.738	9202872.585	4.606	0.002	0.002	0.004
14	696393.738	9202872.585	4.506	0.002	0.002	0.004
15	696393.798	9202872.590	4.083	0.002	0.002	0.012
16	696393.798	9202872.590	3.983	0.002	0.002	0.012

Tabel Koordinat GCP dari Arah Surabaya pada Pengukuran Tanggal 7 Mei 2015 dalam Sistem Koordinat UTM (Satuan meter)

GCP	Koordinat UTM			Standar Deviasi		
	Northing (m)	Easting (m)	Height (m)	E (m)	N (m)	H (m)
1	696392.883	9202859.107	5.131	0.000	0.000	0.044
2	696392.883	9202859.107	5.031	0.000	0.000	0.084
3	696392.883	9202859.100	4.090	0.000	0.000	0.094
4	696392.883	9202859.100	3.990	0.000	0.000	0.074
5	696393.326	9202865.423	5.143	0.000	0.000	0.102
6	696393.326	9202865.423	5.043	0.000	0.000	0.063
7	696393.390	9202865.453	4.093	0.000	0.000	0.080
8	696393.390	9202865.453	3.993	0.000	0.000	0.112
9	696393.663	9202871.363	5.129	0.000	0.000	0.044
10	696393.663	9202871.363	5.029	0.000	0.000	0.084
11	696393.671	9202871.366	4.033	0.000	0.000	0.094
12	696393.671	9202871.366	3.933	0.000	0.000	0.074
13	696393.719	9202872.564	5.016	0.000	0.000	0.102
14	696393.719	9202872.564	4.916	0.000	0.000	0.063
15	696393.769	9202872.566	4.048	0.000	0.000	0.080
16	696393.769	9202872.566	3.948	0.000	0.000	0.112

Tabel Koordinat GCP dari Arah Madura pada Pengukuran Tanggal 19 Maret 2015 dalam Sistem Koordinat UTM (Satuan meter)

GCP	Koordinat UTM			Standar Deviasi		
	Northing (m)	Easting (m)	Height (m)	E (m)	N (m)	H (m)
1	696762.446	9208157.548	5.145	0.002	0.002	0.043
2	696762.446	9208157.548	5.045	0.002	0.002	0.043
3	696762.446	9208157.548	4.093	0.002	0.002	0.026
4	696762.446	9208157.548	3.993	0.002	0.002	0.026
5	696761.928	9208150.332	5.132	0.002	0.002	0.036
6	696761.928	9208150.332	5.032	0.002	0.002	0.036
7	696761.950	9208150.312	4.078	0.002	0.002	0.023
8	696761.950	9208150.312	3.978	0.002	0.002	0.023
9	696761.462	9208143.646	5.099	0.002	0.002	0.039
10	696761.462	9208143.646	4.999	0.002	0.002	0.039
11	696761.462	9208143.648	4.052	0.002	0.002	0.025
12	696761.462	9208143.648	3.952	0.002	0.002	0.025
13	696760.852	9208138.115	5.093	0.002	0.003	0.039
14	696760.852	9208138.115	4.993	0.002	0.003	0.039
15	696760.853	9208138.098	3.993	0.002	0.003	0.022
16	696760.853	9208138.098	3.893	0.002	0.003	0.022

Tabel Koordinat GCP dari Arah Madura pada Pengukuran Tanggal 7 Mei 2015 dalam Sistem Koordinat UTM (Satuan meter)

GCP	Koordinat UTM			Standar Deviasi		
	Northing (m)	Easting (m)	Height (m)	E (m)	N (m)	H (m)
1	696762.487	9208157.542	5.126	0.016	0.024	0.015
2	696762.487	9208157.542	5.026	0.016	0.024	0.002
3	696762.483	9208157.526	4.089	0.016	0.029	0.005
4	696762.483	9208157.526	3.989	0.016	0.029	0.003
5	696761.972	9208150.319	5.106	0.016	0.035	0.103
6	696761.972	9208150.319	5.006	0.016	0.035	0.078
7	696761.972	9208150.319	4.069	0.016	0.040	0.028
8	696761.972	9208150.319	3.969	0.016	0.040	0.003
9	696761.486	9208143.644	5.018	0.016	0.024	0.015
10	696761.486	9208143.644	4.918	0.016	0.024	0.002
11	696761.481	9208143.642	3.992	0.016	0.029	0.005
12	696761.481	9208143.642	3.892	0.016	0.029	0.003
13	696760.849	9208138.121	5.060	0.016	0.035	0.103
14	696760.849	9208138.121	4.960	0.016	0.035	0.078
15	696760.849	9208138.119	3.987	0.016	0.040	0.028
16	696760.849	9208138.119	3.887	0.016	0.040	0.003

Lampiran 10

Tabel Parameter Orientasi Luar Foto Bentang 1 (arah Surabaya)

EOP	19 MARET 2015			7 MEI 2015		
	1	2	3	1	2	3
ω (radian)	0.000	0.000	0.000	251.832	-593.143	3877.584
ϕ (radian)	0.000	0.000	0.000	-108.852	-81.822	-40.858
κ (radian)	-1.795	-1.766	-1.754	223.210	-692.711	3797.802
XL (m)	696393.600	696392.500	696392.400	696428.000	696382.600	696357.300
YL (m)	9202866.000	9202861.000	9202861.000	9202684.000	9202879.000	9202874.000
ZL (m)	6.601	5.863	5.737	121.384	-6.170	26.773

Tabel Parameter Orientasi Luar Foto Bentang 100 (arah Madura)

EOP	19 MARET 2015			7 MEI 2015		
	1	2	3	1	2	3
ω (radian)	-83.706	6901.292	-3451.137	16.676	-311.992	95.018
ϕ (radian)	37.255	87.538	89.637	7.452	-59.293	-38.415
κ (radian)	-1.191	-6989.537	3371.642	-77.033	-375.738	187.395
XL (m)	696785.925	696794.665	696836.983	696770.500	696724.900	696798.600
YL (m)	9208194.066	9208167.099	9208180.426	9208168.000	9208154.000	9208196.000
ZL (m)	7.147	5.791	-1.601	25.070	-25.373	7.571

Lampiran 11

Tabel Koordinat GCP Objek Deformasi Arah Surabaya dalam Sistem Koordinat UTM Pengukuran 19 Maret 2015

GCP	Koordinat GCP		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	696392.750	9202858.698	6.178
2	696392.813	9202858.739	5.836
3	696392.875	9202859.201	3.571
4	696392.750	9202859.252	3.288
5	696393.188	9202865.886	5.862
6	696393.250	9202865.949	5.583
7	696393.188	9202866.360	3.676
8	696393.250	9202866.451	3.408
9	696393.563	9202870.922	5.563
10	696393.500	9202870.965	5.392
11	696393.438	9202871.324	3.707
12	696393.375	9202871.367	3.511
13	696393.500	9202871.589	5.545
14	696393.313	9202871.615	5.400
15	696393.500	9202872.076	3.707
16	696393.438	9202872.102	3.528

Tabel Koordinat GCP Objek Deformasi Arah Surabaya dalam Sistem Koordinat UTM Pengukuran 7 Mei 2015

GCP	Koordinat GCP		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	696392.750	9202858.689	6.164
2	696392.813	9202858.746	5.832
3	696392.875	9202859.203	3.582
4	696392.750	9202859.261	3.264
5	696393.188	9202865.888	5.861
6	696393.250	9202865.965	5.582
7	696393.188	9202866.359	3.697
8	696393.250	9202866.446	3.399
9	696393.563	9202870.928	5.563
10	696393.500	9202870.957	5.399
11	696393.438	9202871.332	3.707
12	696393.375	9202871.358	3.546
13	696393.500	9202871.592	5.553
14	696393.313	9202871.621	5.390
15	696393.500	9202872.092	3.726
16	696393.438	9202872.111	3.524

Tabel Koordinat GCP Objek Deformasi Arah Madura dalam Sistem Koordinat UTM Pengukuran 19 Maret 2015

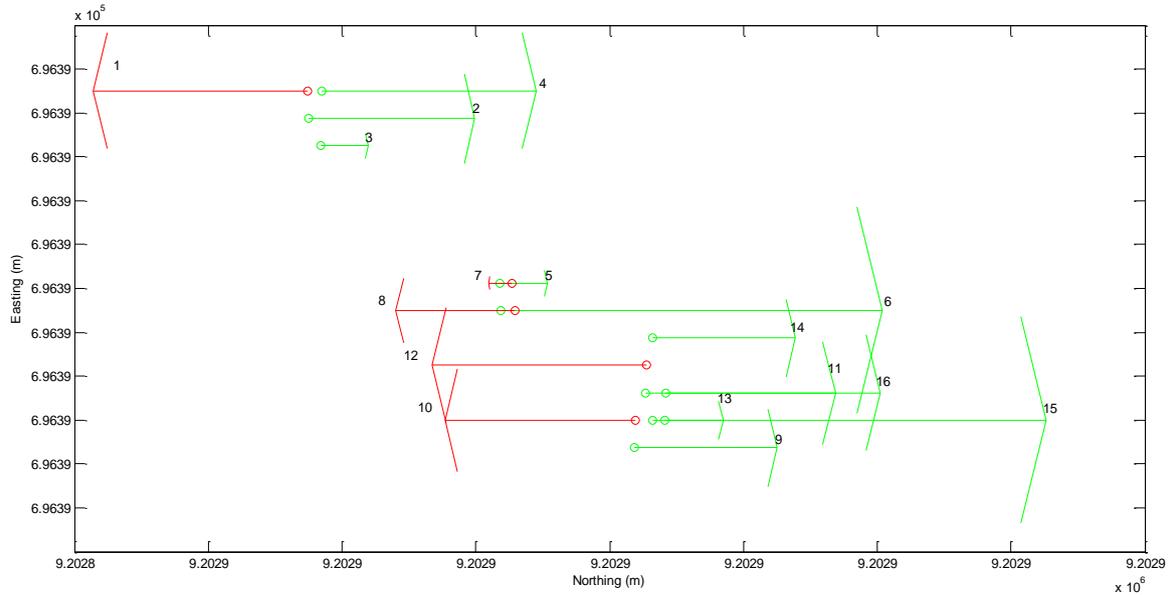
GCP	Koordinat GCP		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	696762.750	9208158.083	6.505
2	696762.688	9208158.083	6.034
3	696762.063	9208157.954	2.933
4	696762.063	9208157.954	2.484
5	696761.750	9208149.848	6.313
6	696761.688	9208149.888	5.996
7	696761.438	9208149.689	3.278
8	696761.438	9208149.660	2.936
9	696761.750	9208143.462	6.434
10	696761.750	9208143.501	5.996
11	696761.375	9208143.443	3.618
12	696761.313	9208143.462	3.325
13	696761.563	9208138.795	6.291
14	696761.500	9208138.786	6.073
15	696761.063	9208138.862	3.696
16	696761.063	9208138.833	3.487

Tabel Koordinat GCP Objek Deformasi Arah Madura dalam Sistem Koordinat UTM Pengukuran 7 Mei 2015

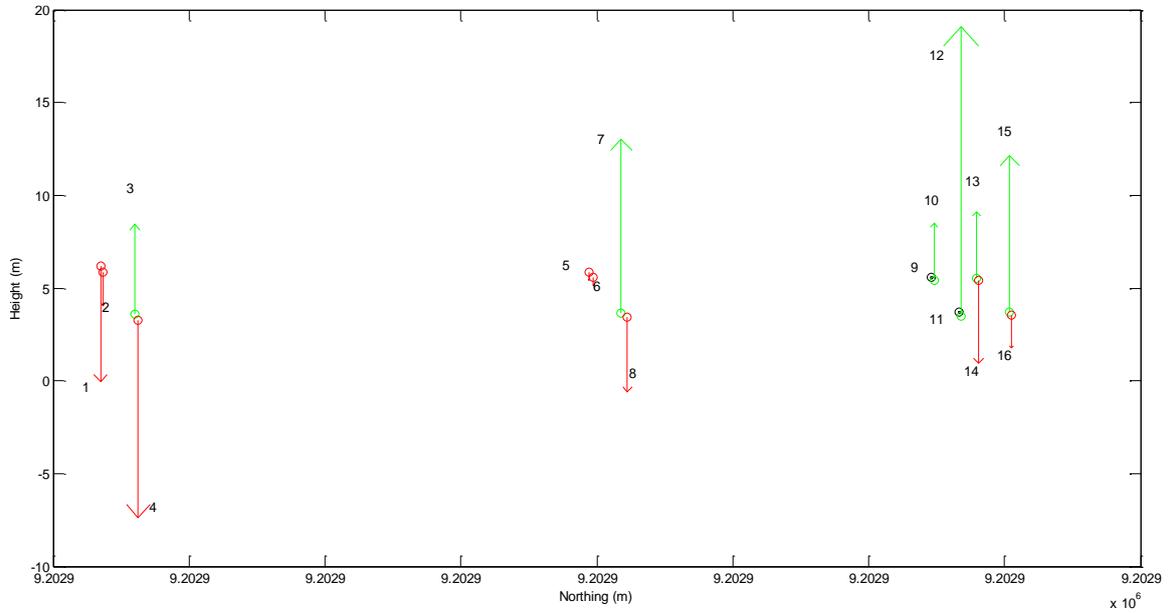
GCP	Koordinat GCP		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	696762.750	9208158.056	6.499
2	696762.688	9208158.056	6.057
3	696762.063	9208157.942	2.949
4	696762.063	9208157.942	2.492
5	696761.750	9208149.872	6.342
6	696761.688	9208149.929	6.014
7	696761.438	9208149.658	3.305
8	696761.438	9208149.672	2.963
9	696761.750	9208143.498	6.470
10	696761.750	9208143.512	6.028
11	696761.375	9208143.427	3.647
12	696761.313	9208143.441	3.362
13	696761.563	9208138.778	6.285
14	696761.500	9208138.772	6.105
15	696761.063	9208138.807	3.704
16	696761.063	9208138.810	3.519

Lampiran 12

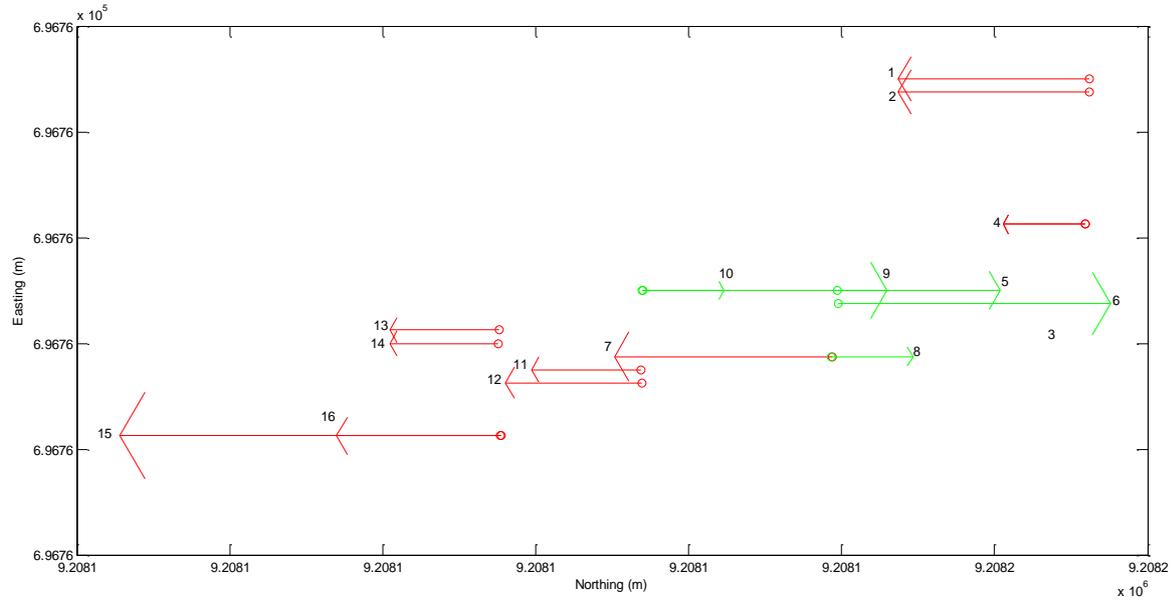
Arah Vektor Pergeseran Jembatan di Arah Surabaya Secara Horizontal (XY)



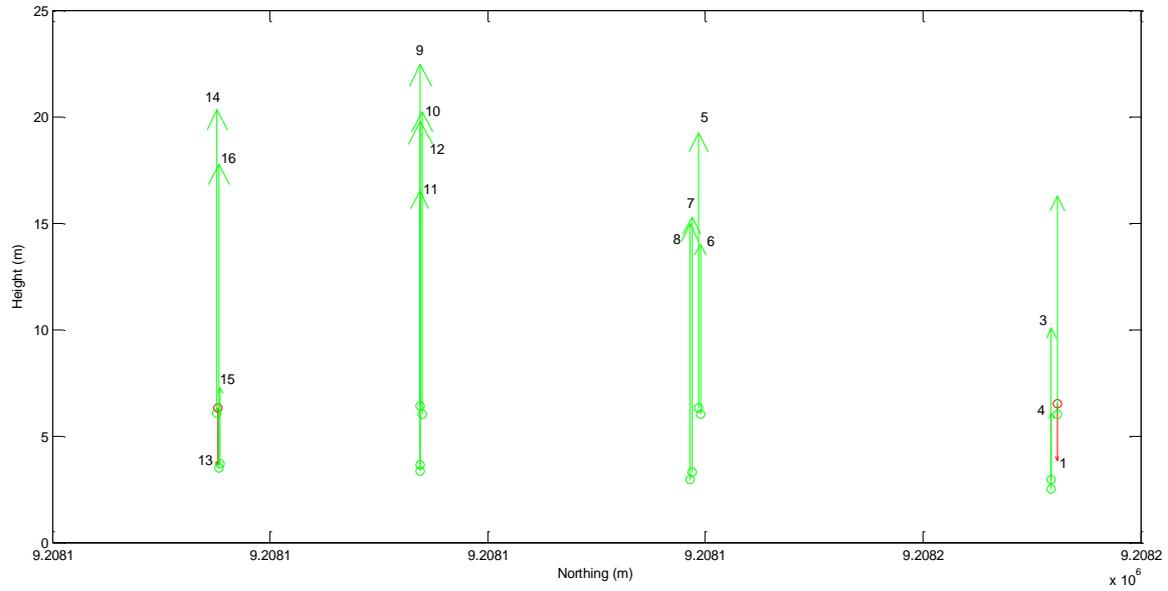
Arah Vektor Pergeseran Jembatan di Arah Surabaya Secara Vertikal (Z)



Arah Vektor Pergeseran Jembatan di Arah Madura Secara Horizontal (XY)

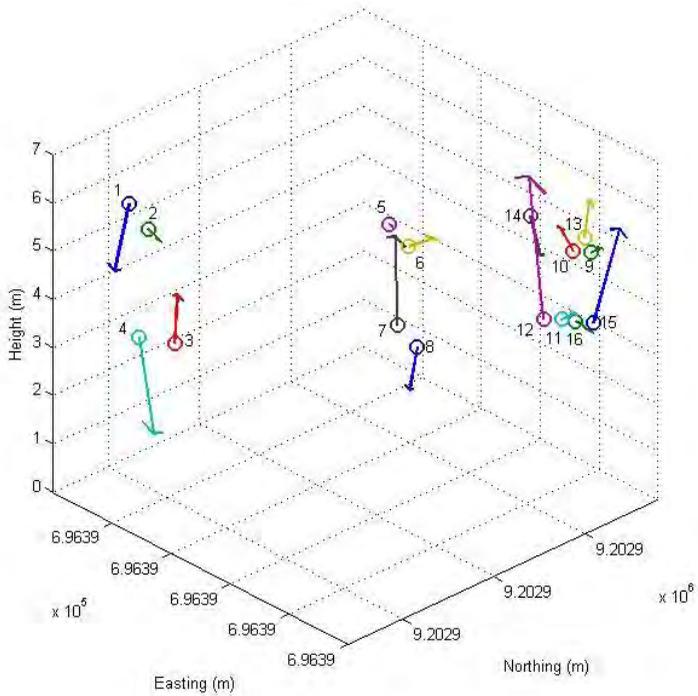


Arah Vektor Pergeseran Jembatan di Arah Madura Secara Vertikal (Z)

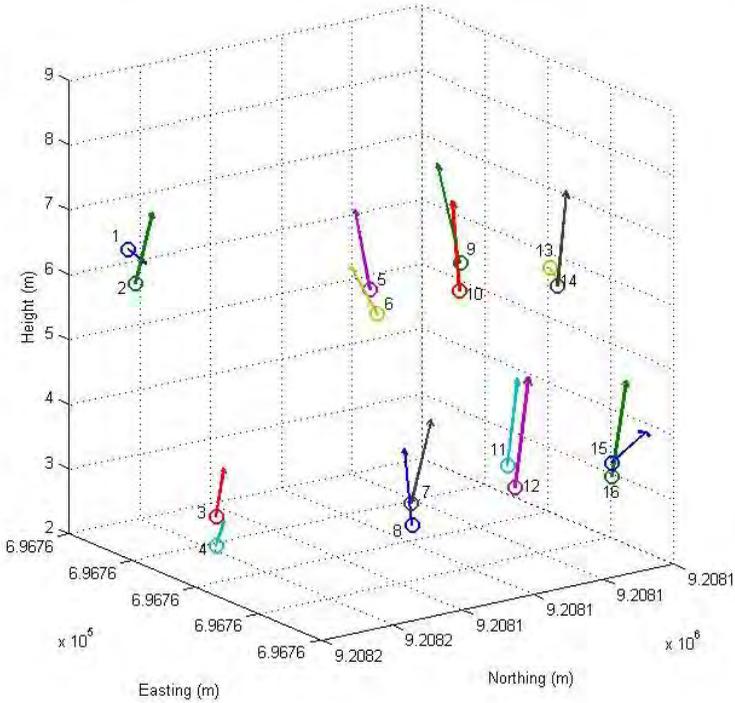


Lampiran 13

Arah Vektor Pergeseran Jembatan Arah Surabaya Secara 3 Dimensi



Arah Vektor Pergeseran Jembatan Arah Madura Secara 3 Dimensi



Lampiran 14

Tabel Hasil Uji *t- student* Koordinat *Easting* Arah Surabaya dalam Satuan Meter

GCP	Total Station (m)		Ortofoto (m)	Interval Minimum (m)	Interval Maksimum (m)
	19 Maret 2015	07 Mei 2015	19 Maret 2015		
1	696392.888	696392.883	696392.750	696392.801	696392.970
2	696392.888	696392.883	696392.813	696392.801	696392.970
3	696392.920	696392.883	696392.875	696392.307	696393.496
4	696392.920	696392.883	696392.750	696392.307	696393.496
5	696393.350	696393.326	696393.188	696392.958	696393.719
6	696393.350	696393.326	696393.250	696392.958	696393.719
7	696393.414	696393.390	696393.188	696393.022	696393.782
8	696393.414	696393.390	696393.250	696393.022	696393.782
9	696393.643	696393.663	696393.563	696393.334	696393.971
10	696393.643	696393.663	696393.500	696393.334	696393.971
11	696393.694	696393.671	696393.438	696393.317	696394.048
12	696393.694	696393.671	696393.375	696393.317	696394.048
13	696393.738	696393.719	696393.500	696393.417	696394.040
14	696393.738	696393.719	696393.313	696393.417	696394.040
15	696393.798	696393.769	696393.500	696393.320	696394.248
16	696393.798	696393.769	696393.438	696393.320	696394.248

Tabel Hasil Uji *t- student* Koordinat *Northing* Arah Surabaya dalam Satuan Meter

GCP	Total Station (m)		Ortofoto (m)	Interval Minimum (m)	Interval Maksimum (m)
	19 Maret 2015	07 Mei 2015	19 Maret 2015		
1	9202859.121	9202859.107	9202858.698	9202858.896	9202859.332
2	9202859.121	9202859.107	9202858.739	9202858.896	9202859.332
3	9202859.129	9202859.100	9202859.201	9202858.656	9202859.573
4	9202859.129	9202859.100	9202859.252	9202858.656	9202859.573
5	9202865.446	9202865.423	9202865.886	9202865.073	9202865.797
6	9202865.446	9202865.423	9202865.949	9202865.073	9202865.797
7	9202865.472	9202865.453	9202866.360	9202865.155	9202865.770
8	9202865.472	9202865.453	9202866.451	9202865.155	9202865.770
9	9202871.386	9202871.363	9202870.922	9202870.998	9202871.751
10	9202871.386	9202871.363	9202870.965	9202870.998	9202871.751
11	9202871.390	9202871.366	9202871.324	9202870.990	9202871.766
12	9202871.390	9202871.366	9202871.367	9202870.990	9202871.766
13	9202872.585	9202872.564	9202871.589	9202872.245	9202872.904
14	9202872.585	9202872.564	9202871.615	9202872.245	9202872.904
15	9202872.590	9202872.566	9202872.076	9202872.194	9202872.961
16	9202872.590	9202872.566	9202872.102	9202872.194	9202872.961

Tabel Hasil Uji *t- student* Koordinat *Height* Arah Surabaya dalam Satuan Meter

GCP	Total Station (m)		Ortofoto (m)	Interval Minimum (m)	Interval Maksimum (m)
	19 Maret 2015	07 Mei 2015	19 Maret 2015		
1	5.166	5.131	6.178	4.596	5.702
2	5.066	5.031	5.836	4.496	5.602
3	4.126	4.090	3.571	3.545	4.671
4	4.026	3.990	3.288	3.445	4.571
5	5.181	5.143	5.862	4.558	5.766
6	5.081	5.043	5.583	4.458	5.666
7	4.129	4.093	3.676	3.536	4.686
8	4.029	3.993	3.408	3.436	4.586
9	5.163	5.129	5.563	4.612	5.680
10	5.063	5.029	5.392	4.512	5.580
11	4.068	4.033	3.707	3.500	4.601
12	3.968	3.933	3.511	3.400	4.501
13	4.606	5.016	5.545	-1.707	11.329
14	4.506	4.916	5.400	-1.807	11.229
15	4.083	4.048	3.707	3.509	4.622
16	3.983	3.948	3.528	3.409	4.522

Tabel Hasil Uji *t- student* Koordinat *Easting* Arah Madura dalam Satuan Meter

GCP	Total Station (m)		Ortofoto (m)	Interval Minimum (m)	Interval Maksimum (m)
	19 Maret 2015	07 Mei 2015	19 Maret 2015		
1	696762.446	696762.487	696762.750	696761.825	696763.108
2	696762.446	696762.487	696762.688	696761.825	696763.108
3	696762.446	696762.483	696762.063	696761.886	696763.043
4	696762.446	696762.483	696762.063	696761.886	696763.043
5	696761.928	696761.972	696761.750	696761.251	696762.650
6	696761.928	696761.972	696761.688	696761.251	696762.650
7	696761.950	696761.972	696761.438	696761.601	696762.321
8	696761.950	696761.972	696761.438	696761.601	696762.321
9	696761.462	696761.486	696761.750	696761.090	696761.857
10	696761.462	696761.486	696761.750	696761.090	696761.857
11	696761.462	696761.481	696761.375	696761.167	696761.775
12	696761.462	696761.481	696761.313	696761.167	696761.775
13	696760.852	696760.849	696761.563	696760.796	696760.905
14	696760.852	696760.849	696761.500	696760.796	696760.905
15	696760.853	696760.849	696761.063	696760.785	696760.917
16	696760.853	696760.849	696761.063	696760.785	696760.917

Tabel Hasil Uji *t- student* Koordinat *Northing* Arah Madura dalam Satuan Meter

GCP	Total Station (m)		Ortofoto (m)	Interval Minimum (m)	Interval Maksimum (m)
	19 Maret 2015	07 Mei 2015	19 Maret 2015		
1	9208157.548	9208157.542	9208158.083	9208157.450	9208157.640
2	9208157.548	9208157.542	9208158.083	9208157.450	9208157.640
3	9208157.548	9208157.526	9208157.954	9208157.189	9208157.884
4	9208157.548	9208157.526	9208157.954	9208157.189	9208157.884
5	9208150.332	9208150.319	9208149.848	9208150.125	9208150.527
6	9208150.332	9208150.319	9208149.888	9208150.125	9208150.527
7	9208150.312	9208150.319	9208149.689	9208150.205	9208150.427
8	9208150.312	9208150.319	9208149.660	9208150.205	9208150.427
9	9208143.646	9208143.644	9208143.462	9208143.621	9208143.670
10	9208143.646	9208143.644	9208143.501	9208143.621	9208143.670
11	9208143.648	9208143.642	9208143.443	9208143.546	9208143.744
12	9208143.648	9208143.642	9208143.462	9208143.546	9208143.744
13	9208138.115	9208138.121	9208138.795	9208138.026	9208138.210
14	9208138.115	9208138.121	9208138.786	9208138.026	9208138.210
15	9208138.098	9208138.119	9208138.862	9208137.781	9208138.436
16	9208138.098	9208138.119	9208138.833	9208137.781	9208138.436

Tabel Hasil Uji *t- student* Koordinat *Height* Arah Madura dalam Satuan Meter

GCP	Total Station (m)		Ortofoto (m)	Interval Minimum (m)	Interval Maksimum (m)
	19 Maret 2015	07 Mei 2015	19 Maret 2015		
1	5.145	5.126	6.505	4.842	5.429
2	5.045	5.026	6.034	4.742	5.329
3	4.093	4.089	2.933	4.031	4.151
4	3.993	3.989	2.484	3.931	4.051
5	5.132	5.106	6.313	4.697	5.541
6	5.032	5.006	5.996	4.597	5.441
7	4.078	4.069	3.278	3.933	4.214
8	3.978	3.969	2.936	3.833	4.114
9	5.099	5.018	6.434	3.763	6.354
10	4.999	4.918	5.996	3.663	6.254
11	4.052	3.992	3.618	3.067	4.977
12	3.952	3.892	3.325	2.967	4.877
13	5.093	5.060	6.291	4.561	5.592
14	4.993	4.960	6.073	4.461	5.492
15	3.993	3.987	3.696	3.884	4.097
16	3.893	3.887	3.487	3.784	3.997

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Blora, 28 April 1993, merupakan anak kedua dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK YAPITA, SDI YAPITA, kemudian melanjutkan ke SMPN 19 Surabaya dan SMAN 16 Surabaya. Setelah lulus dari SMA. Penulis melanjutkan kuliah S-1 dengan mengikuti program SNMPTN jalur undangan dan diterima di Teknik Geomatika – FTSP, ITS pada tahun 2011 terdaftar dengan NRP 3511 100 014. Selama kuliah di Teknik Geomatika. Penulis aktif mengikuti organisasi di ITS, yakni HIMAGE dan aktif bergabung dalam kepanitiaan berbagai acara tingkat jurusan, fakultas maupun institut. Di akhir tahun 2014, penulis menjadi salah satu tim peneliti dosen Teknik Geomatika yaitu Ibu Hepi Hapsari, S.T, M.Sc. Di akhir masa studi sarjananya penulis melakukan sebuah penelitian dengan judul “Ortorektifikasi Foto Format Kecil untuk Perhitungan Deformasi Jembatan (Studi Kasus : Jembatan Suramadu, Surabaya – Madura)”.