



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - RG 141536

**PEMANFAATAN FOTOGRAMETRI RENTANG  
DEKAT UNTUK PEMODELAN 3D CAGAR BUDAYA  
MENGUNAKAN KAMERA NON-METRIK *DSLM*  
DAN *DSLR*  
(STUDI KASUS: CANDI BRAHU, MOJOKERTO)**

MOCH SANI SALAM  
NRP 3512 100 057

Dosen Pembimbing  
Hepi Hapsari H., ST., M.Sc.

JURUSAN TEKNIK GEOMATIKA  
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016



“Halaman ini sengaja dikosongkan”



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

FINAL ASSIGNMENT - RG 141536

**CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY FOR 3D  
MODELING OF CULTURAL HERITAGE  
BUILDINGS USING DSLM AND DSLR CAMERAS  
AS NON-METRIC CAMERA  
(CASE STUDY: BRAHU TEMPLE, MOJOKERTO)**

MOCH SANI SALAM  
NRP 3512 100 057

Supervisor  
Hepi Hapsari H., ST., M.Sc.

GEOMATIC ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Civil Engineering and Planning  
Sepuluh Nopember of Institute Technology  
Surabaya 2016



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**PEMANFAATAN FOTOGRAMETRI RENTANG  
DEKAT UNTUK PEMODELAN 3D CAGAR BUDAYA  
MENGUNAKAN KAMERA NON-METRIK *DSLM*  
DAN *DSLR*  
(STUDI KASUS : CANDI BRAHU, MOJOKERTO)**

**Nama Mahasiswa** : Moch Sani Salam  
**NRP** : 3512100057  
**Jurusan** : Teknik Geomatika FTSP-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Hepi Hapsari H., ST., M.Sc.

**Abstrak**

Candi Brahu merupakan candi agama Buddha yang masuk dalam Cagar Budaya Indonesia yang berada di Trowulan, Mojokerto. Sebagai pemegang warisan budaya perlu melakukan pelestarian sebelum warisan yang ada tersebut hilang, salah satunya dengan melakukan pendokumentasian, yaitu dengan cara pemodelan 3 dimensi (3D). Salah satu metode yang bisa dipakai untuk pemodelan 3D secara cepat, murah, dan teliti adalah fotogrametri rentang dekat. Kegiatan fotogrametri dapat menggunakan kamera non-metrik sebagai alat akuisisi data fotonya. Kamera yang digunakan dalam penelitian ini adalah kamera non-metrik jenis *Digital Single Lens Mirrorless (DSLM)* dan *Digital Single Lens Reflex (DSLR)*. Perbedaan dari kedua kamera ini adalah kamera *DSLR* mempunyai cermin pantul dan pentaprisma sebagai alat pembidik optik, sedangkan kamera *DSLM* tidak mempunyai sehingga kamera ini menggunakan sistem elektronik pada waktu membidik.

Sebelum melakukan pemotretan candi dilakukan kalibrasi kamera terlebih dahulu pada kedua kamera dengan memotret *checkerboard pattern*. Pemotretan candi dilakukan dari berbagai sudut dengan mengelilinginya. Jumlah foto diolah menjadi model 3D sebanyak 80 foto baik dari kamera *DSLM* maupun *DSLR*. Foto-foto tersebut direkonstruksi menjadi *dense point cloud model*,

*surface model* dan *texturing model*. Kemudian dilakukan *georeference* supaya geometrik model 3D sesuai dengan di lapangan.

Hasil kalibrasi kamera diketahui bahwa distorsi radial pada kamera *DSLR* lebih besar daripada kamera *DSLM*. Rekonstruksi 3D dari foto kamera *DSLM* dan *DSLR* berhasil dilakukan. Feature yang terbentuk dari foto *DSLM* lebih bagus daripada *DSLR*. Ketelitian model 3D data *DSLM* adalah 3,803cm, sedangkan model 3D data *DSLR* sebesar 3,650cm. Hasil uji statistik t-test adalah hipotesa nol ICP diterima untuk model dari *DSLM* sebesar 66,67% dan 70,00% untuk *DSLR*. Perbedaan geometrik kedua model 3D tidak signifikan dengan hasil pengukuran total station. Nilai geometrik pada kamera *DSLM* tidak signifikan berbeda dengan *DSLR*. Jadi tidak adanya cermin pantul dan pentaprisma pada kamera *DSLM* tidak berpengaruh terhadap nilai geometrik.

Kata Kunci: Model 3D, Fotogrametri Rentang Dekat, Candi Brahu, *DSLM*, *DSLR*

**CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY FOR 3D  
MODELING OF CULTURAL HERITAGE  
BUILDINGS USING DSLM AND DSLR CAMERAS  
AS NON-METRIC CAMERA  
(CASE STUDY: BRAHU TEMPLE, MOJOKERTO)**

**Student Name** : Moch Sani Salam  
**Reg. Number** : 3512100057  
**Department** : Geomatics Engineering FTSP-ITS  
**Supervisor** : Hepi Hapsari H., ST., M.Sc.

**Abstract**

*Brahu temple is a Budhist temple that is included in the Heritage of Indonesia and is located in Trowulan, Mojokerto. As the holder of cultural heritage, we need to do the conservation before it become lost. One of the conservation ways is by doing documentation with three-dimensional (3D) modeling. One of methods that can be used for 3D modeling fast, cheap, and meticulous is Close-range photogrammetry (CRP). In doing photogrammetry activities, it can be use non-metric camera as acquisition tool of photograph. The camera used in this study is a non-metric camera type Digital Single Lens Mirrorless (DSLM) and Digital Single Lens Reflex (DSLR). The difference between those cameras is DSLR have a reflector mirror and pentaprism as an optical viewfinder, meanwhile DSLM have none of this so it uses electronic system for the viewfinder.*

*Before photographing the temple, camera calibration is performed on both of the type of camera by photographing checkerboard pattern. Temple photo shoot is done from various angles by surrounding it. The number of images processed into a 3D model as many as 80 photos from both cameras. The images are reconstructed into a dense point cloud model, surface model and texturing model. Then, georeferencing process is done to make the geometric 3D model appropriate to the real world.*

*The results of camera calibration show that radial distortion from DSLR camera is bigger than DSLM camera. 3D reconstruction of photographs of DSLM and DSLR camera is successful. Feature of 3D model from photographs of DSLM camera is better than DSLR camera. Accuracy of 3D model from DSLM data is 3,803cm and for model 3D from DSLR is 3,650cm. The statistical test, t-test of the value of ICP, show that null hypothesis is accepted with percentage for DSLM model is 66,67% and for DSLR is 70.00%. Therefore, the difference of geometric value between DSLM model and DSLR is not significant with measurement of total station. The geometric value of DSLM camera is not significantly different with DSLR camera. So the absence of the reflection mirror and pentaprism in the DSLM camera does not affect the value of the geometric.*

**Keywords: 3D modeling, CRP, Brahu Temple, DSLM, DSLR**



**PEMANFAATAN FOTOGRAMETRI RENTANG DEKAT  
UNTUK PEMODELAN 3D CAGAR BUDAYA  
MENGUNAKAN KAMERA NON-METRIK *DSLM* DAN  
*DSLR*  
(STUDI KASUS: CANDI BRAHU, MOJOKERTO)**

**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:  
**MOCH SANI SALAM**  
Nrp. 3512100057

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

1. Hepi Hapsari H., ST., M.Sc.  
NIP.197812122005012001

**SURABAYA, JUNI 2016**





## KATA PENGANTAR

Rasa syukur yang mendalam penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas segala rahmat dan anugerah-Nya tugas akhir dengan judul “Pemanfaatan Fotogrametri Rentang Dekat untuk Pemodelan 3D Cagar Budaya Menggunakan Kamera Non-metrik *DSLM* dan *DSLR* (Studi Kasus : Candi Brahu, Mojokerto)” 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.

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

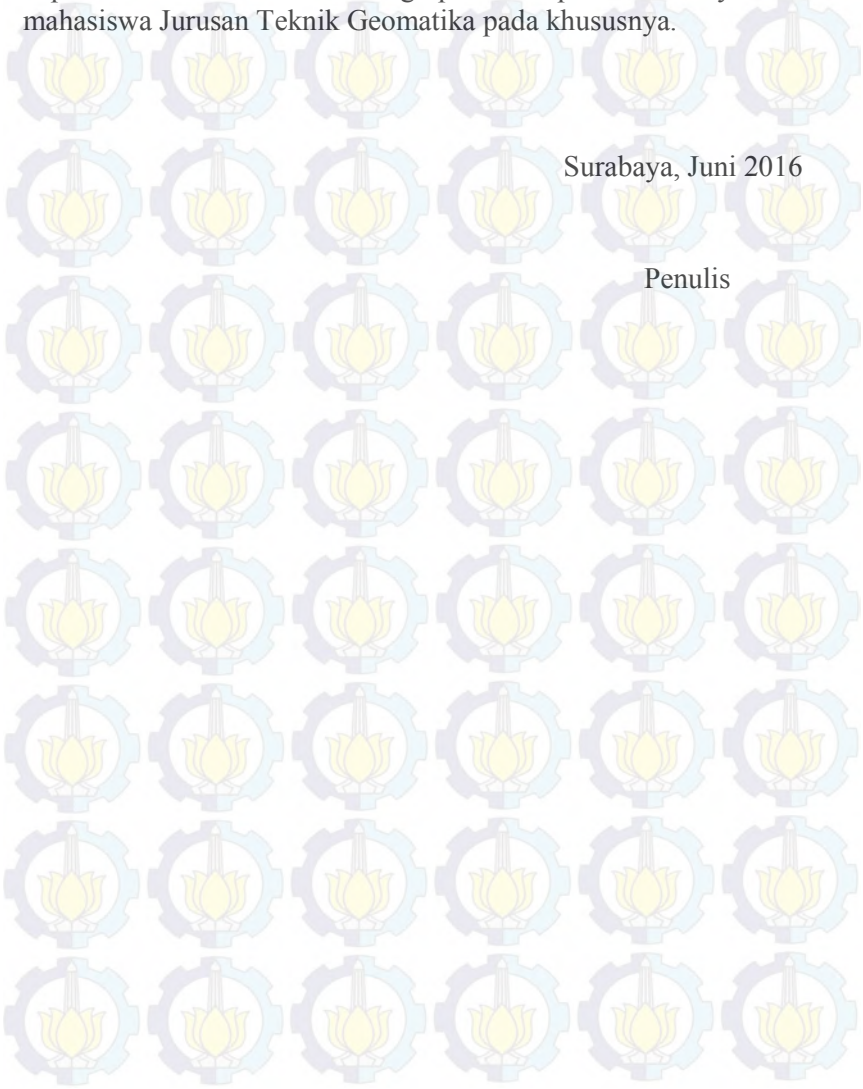
1. Orang tua penulis yang telah memberikan dukungan dan do’a restu.
2. Ibu Hepi Hapsari Handayani, ST., M.Sc. selaku dosen pembimbing yang telah banyak meluangkan waktu untuk membantu pelaksanaan penelitian ini.
3. Kepala Balai Pelestarian Cagar Budaya (BPCB) Jawa Timur beserta jajarannya yang telah memberikan ijin untuk dapat mengakses Cagar Budaya Candi Brahu.
4. 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.
5. Seluruh rekan Jurusan Teknik Geomatika terutama Sahabat Gelembung, HHH Team dan Angkatan 2012 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

untuk 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, Juni 2016

Penulis



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
ABSTRAK .....	v
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xix
<b>BAB I PENAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
<b>BAB II DASAR TEORI</b>	
2.1 Fotogrametri Rentang Dekat .....	7
2.1.1. Prinsip Fotogrametri Rentang Dekat.....	7
2.1.2. Reseksi Ruang.....	9
2.1.3. Interseksi Spasial.....	10
2.2 Cagar Budaya .....	11
2.3 Kamera .....	12
2.3.1. Kamera <i>DSLR</i> .....	13
2.3.2. Kamera <i>DSLM</i> .....	16
2.4 Kalibrasi Kamera.....	17
2.4.1. Distorsi Radial.....	19
2.4.2. Distorsi Tangensial .....	20
2.5 Pemodelan 3 Dimensi.....	21
2.6 Desain Kekuatan Jaring.....	22
2.7 <i>Ground Sample Distance (GSD)</i> .....	24
2.8 <i>Root Mean Square Error (RMSE)</i> .....	25
2.8 Uji Statistik t-test.....	25
2.9 Penelitian Terdahulu.....	27
<b>BAB III METODOLOGI</b>	
3.1 Lokasi Penelitian.....	31

3.2	Data dan Peralatan.....	31
3.3	Metodologi Penelitian .....	34
BAB IV HASIL DAN ANALISA		
4.1	Hasil.....	45
6.1.1.	Perhitungan Poligon.....	45
6.1.2.	Perhitungan GCP dan ICP .....	47
4.1.3.	Kalibrasi Kamera.....	50
4.1.4.	Hasil Pemotretan Objek .....	52
4.1.5.	Hasil Model 3D.....	55
4.2	Analisa.....	62
4.2.1.	Analisa Kerangka Kontrol.....	62
4.2.2.	Analisa Kalibrasi Kamera .....	63
4.2.3.	Analisa Model 3D .....	68
4.2.4.	Analisa Proses <i>Georeference</i> .....	71
4.2.5.	Analisa Koordinat ICP .....	71
BAB V PENUTUP		
5.1.	Kesimpulan.....	77
5.2.	Saran .....	78
DAFTAR PUSTAKA.....		79
LAMPIRAN .....		83
BIODATA PENULIS.....		87

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Kondisi Kolinear .....	8
Gambar 2. 2 Interseksi Spasial .....	10
Gambar 2. 3 Struktur dari kamera <i>DSLR</i> .....	14
Gambar 2. 4 Perbedaan kamera <i>DSLR</i> (kiri) dan <i>DSLM</i> (kanan) .....	16
Gambar 2. 5 Ilustrasi distorsi radial .....	20
Gambar 3. 1 Lokasi Candi Brahu .....	31
Gambar 3. 2 Kamera Sony Alpha 6000 .....	32
Gambar 3. 3 Kamera <i>DSLR</i> Nikon D3200 .....	32
Gambar 3. 4 <i>TOPCON GL235N OL3263</i> .....	33
Gambar 3. 5 Diagram alir tahapan penelitian .....	35
Gambar 3. 6 Diagram alir kalibrasi kamera .....	38
Gambar 3. 7 Diagram alir pemodelan 3D .....	40
Gambar 3. 8 Titik BM disebelah barat candi .....	41
Gambar 4. 1 Sketsa pengukuran kerangka kontrol .....	45
Gambar 4. 2 Konfigurasi jaring pada pengukuran kerangka kontrol .....	46
Gambar 4. 3 Letak GCP dan ICP tampak sebelah barat candi .....	48
Gambar 4. 4 Letak GCP dan ICP tampak sebelah utara candi .....	49
Gambar 4. 5 Letak GCP dan ICP tampak sebelah timur candi .....	49
Gambar 4. 6 Letak GCP dan ICP tampak sebelah selatan candi .....	50
Gambar 4. 7 Contoh foto bidang kolimator diambil dari berbagai sudut .....	51
Gambar 4. 8 Beberapa contoh foto Candi Brahu menggunakan <i>DSLM</i> tampak sebelah (a) barat, (b) utara, (c) timur, dan (d) selatan .....	53
Gambar 4. 9 Posisi kamera <i>DSLM</i> .....	54
Gambar 4. 10 Beberapa contoh foto Candi Brahu menggunakan <i>DSLR</i> tampak sebelah (a) barat, (b) utara, (c) timur, dan (d) selatan .....	54
Gambar 4. 11 Posisi kamera <i>DSLR</i> .....	55
Gambar 4. 12 <i>Point Cloud</i> dari data <i>DSLM</i> tampak sebelah atas (a), barat (b), utara (c), timur (d), dan selatan (e) Candi Brahu .....	56

Gambar 4. 13 <i>Point Cloud</i> dari data <i>DSLR</i> tampak sebelah atas (a), barat (b), utara (c), timur (d), dan selatan (e) Candi Brahu .....	57
Gambar 4. 14 <i>Surface model</i> dari data <i>DSLM</i> tampak sebelah atas (a), barat (b), utara (c), timur (d), dan selatan (e) Candi Brahu.....	58
Gambar 4. 15 <i>Surface model</i> dari data <i>DSLR</i> tampak sebelah atas (a), barat (b), utara (c), timur (d), dan selatan (e) Candi Brahu.....	59
Gambar 4. 16 <i>Texture Model</i> pada dari data <i>DSLM</i> tampak sebelah atas (a), barat (b), utara (c), timur (d), dan selatan (e) Candi Brahu.....	60
Gambar 4. 17 <i>Texture Model</i> pada dari data <i>DSLR</i> tampak sebelah atas (a), barat (b), utara (c), timur (d), dan selatan (e) Candi Brahu.....	61
Gambar 4. 18 Posisi penempatan titik GCP pada Candi Brahu dilihat dari atas .....	62
Gambar 4. 19 Foto yang ditolak pada saat kalibrasi.....	63
Gambar 4. 20 Visualisasi posisi kamera <i>DSLM</i> saat pemotretan <i>checkerboard pattern</i> .....	64
Gambar 4. 21 Visualisasi posisi kamera <i>DSLR</i> saat pemotretan <i>checkerboard pattern</i> .....	64
Gambar 4. 22 Grafik <i>reprojection error</i> foto dari kamera <i>DSLM</i> dan <i>DSLR</i> .....	65
Gambar 4. 23 Model distorsi radial kamera <i>DSLM</i> .....	67
Gambar 4. 24 Model distorsi radial kamera <i>DSLR</i> .....	67
Gambar 4. 25 Grafik perbandingan jumlah <i>point</i> pada model <i>dense point cloud</i> .....	68
Gambar 4. 26 Grafik perbandingan model <i>Meshing Point</i> .....	69
Gambar 4. 27 Deviasi komparasi model <i>DSLM</i> terhadap model <i>DSLR</i> .....	70
Gambar 4. 28 Grafik distribusi deviasi komparasi model 3D .....	70
Gambar 4. 29 Grafik perbandingan persentase hipotesa nol koordinat <i>ICP</i> yang diterima .....	75



## DAFTAR TABEL

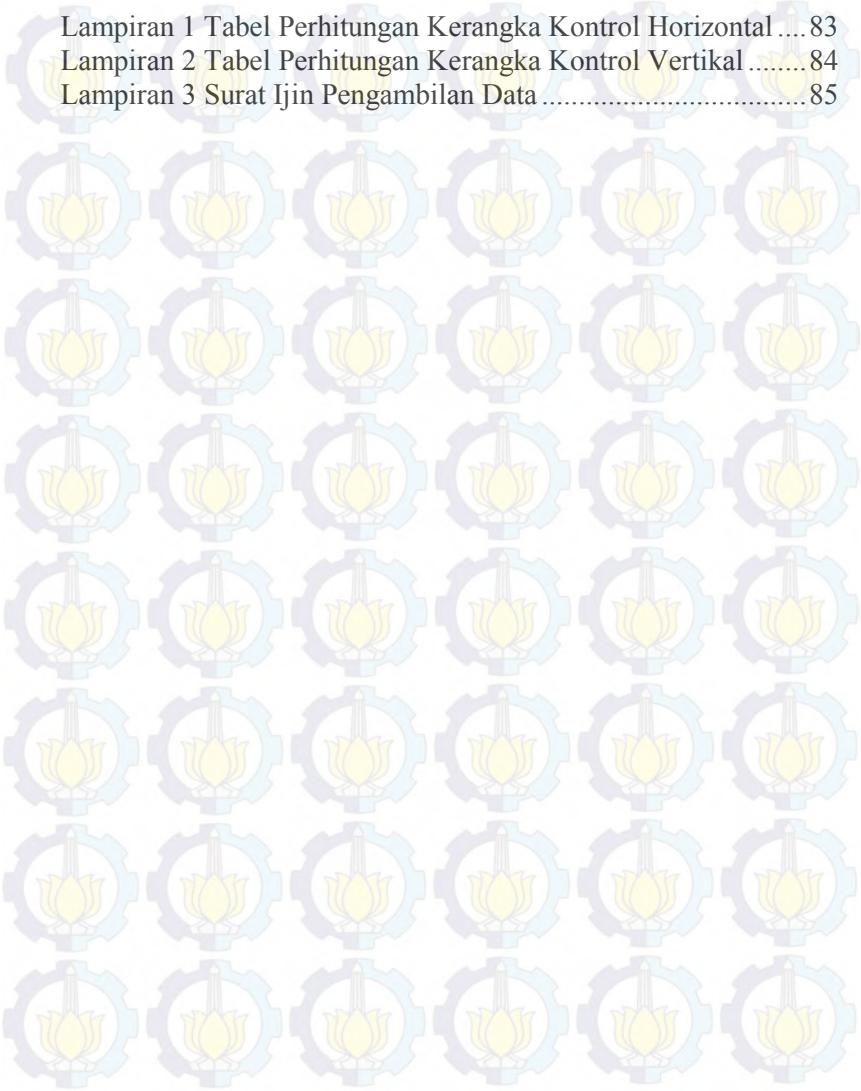
Tabel 2. 1 Kategori kualitas diterimanya hipotesa nol .....	26
Tabel 4. 1 Koordinat titik Kontrol .....	46
Tabel 4. 2 Koordinat GCP .....	47
Tabel 4. 3 Koordinat ICP .....	47
Tabel 4. 4 Hasil kalibrasi kamera .....	52
Tabel 4. 5 Kesalahan kerangka kontrol .....	62
Tabel 4. 6 Standar deviasi kalibrasi kamera .....	66
Tabel 4. 7 Perhitungan nilai fungsi distorsi radial $f(r)$ .....	66
Tabel 4. 8 RMSE proses <i>georeference</i> .....	71
Tabel 4. 9 RMSE Koordinat ICP .....	71
Tabel 4. 10 Hasil Uji <i>t-student</i> titik <i>ICP</i> pada koordinat Easting	72
Tabel 4. 11 Hasil Uji <i>t-student</i> titik <i>ICP</i> pada koordinat Northing	73
Tabel 4. 12 Hasil Uji <i>t-student</i> titik <i>ICP</i> pada koordinat Height	73
Tabel 4. 13 Hasil keseluruhan analisa <i>ICP</i> .....	75



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Tabel Perhitungan Kerangka Kontrol Horizontal ....	83
Lampiran 2 Tabel Perhitungan Kerangka Kontrol Vertikal .....	84
Lampiran 3 Surat Ijin Pengambilan Data .....	85





“Halaman ini sengaja dikosongkan”

# BAB I

## PENAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dewasa ini pemodelan 3 dimensi banyak diterapkan pada objek-objek yang dianggap penting baik objek alam ataupun objek buatan manusia seperti warisan budaya, industri, animasi, dan yang lainnya. Suatu objek dikatakan 3 dimensi apabila objek tersebut memiliki dimensi panjang, lebar dan tinggi yang direpresentasikan dalam koordinat 3 dimensi (X,Y,Z). Seiring berkembangnya teknologi pemetaan, pemodelan objek 3 dimensi menjadi sangat diperlukan untuk perencanaan, konstruksi, rekonstruksi, ataupun manajemen asset. Pemodelan 3 dimensi bertujuan untuk mengatasi persoalan akan dimensi ketinggian (Z) yang tidak tersaji pada bidang 2 dimensi untuk objek yang sangat rumit dan apabila objek tersebut disajikan pada penampakan 2 dimensi terdapat informasi yang hilang (Wahab, 2009). Terdapat banyak metode untuk pemodelan 3 dimensi objek tergantung alat yang digunakan dan semuanya mempunyai kelebihan serta kekurangan. Salah satu metode untuk pemodelan 3 dimensi objek adalah fotogrametri rentang dekat.

Fotogrametri rentang dekat (*close range photogrammetry*) merupakan cabang dari ilmu fotogrametri, yang membedakannya adalah posisi kamera dengan objek tersebut. Fotogrametri sendiri merupakan teknologi *remote sensing* dimana geometri objek ditentukan oleh citra fotografi. Fotogrametri menghasilkan koordinat 3D dari gambar 2D. Fotogrametri rentang dekat muncul pada saat teknik ini digunakan untuk obyek yang dipotret dengan jarak kurang dari 100 meter dan posisi kamera dekat dengan obyek tersebut (Atkinson, 1996). Dengan metode ini akan menghasilkan model 3D sesuai kenyataan (radiometrik dan geometrik) sehingga dapat diggunakan sebagai dokumentasi (Cowley, 2011). Fotogrametri rentang dekat bisa diaplikasikan untuk memonitoring deformasi dari jembatan (Handayani, dkk., 2015). Selain itu banyak

digunakan untuk memodelkan 3D cagar budaya dengan detail sesuai dengan keadaan sebenarnya (Yastikli, dkk., 2003)

Kegiatan fotogrametri sekarang ini banyak menggunakan kamera non-metrik. Hal tersebut dikarenakan kamera non-metrik terdiri dari banyak tipe sehingga sangat terjangkau dari segi harga dan kamera tersebut serta sangat fleksibel digunakan kapan pun dan dimana pun. Beberapa tahun ini tengah berkembang kamera jenis baru, yaitu *Digital Single Lens Mirrorless (DSLM)*. Kamera jenis ini merupakan revolusi dari kamera *Digital Single Lens Reflex (DSLR)*. *DSLR* sendiri merupakan kamera digital yang menggunakan sistem cermin otomatis dan pentaprisma atau *pentamirror* untuk meneruskan cahaya dari lensa menuju ke *view finder*. Berbeda dengan kamera *DSLR*, kamera *DSLM* tidak mempunyai cermin pantul dan pentaprisma seperti yang terdapat di kamera *DSLR* sehingga cahaya yang masuk langsung ditekankan ke sensor dan ditampilkan pada layar LCD atau *Electronic View Finder*. Oleh karena itu ukuran kamera *DSLM* jauh lebih tipis dan mempunyai bobot yang lebih ringan dibandingkan dengan kamera *DSLR*. Berbeda dengan kamera metrik, dua kamera non-metrik ini mempunyai kekurangan, yaitu tidak mempunyai sistem koordinat, tidak ada *fiducial mark*, tidak diketahui elemen orientasi dalam dan tidak diketahui distorsi lensanya.

Kamera non-metrik bisa digunakan untuk fotogrametri jika kamera tersebut telah dilakukan kalibrasi. Kalibrasi kamera adalah proses menentukan parameter internal dari sebuah kamera. Parameter tersebut adalah *focal length*, posisi titik utama foto, serta distorsi radial dan tangensial lensa yang digunakan. Salah satu metode kalibrasi kamera adalah dengan metode *self-calibration*. Pada metode *self-calibration* pengukuran titik-titik target pada objek pengamatan digunakan sebagai data untuk penentuan koordinat titik objek dan parameter exterior orientasi dari kamera sekaligus untuk menentukan parameter kalibrasi kamera.

Menurut UU Nomor 11 Tahun 2010, Cagar Budaya adalah warisan budaya bersifat kebendaan berupa Benda Cagar Budaya, Bangunan Cagar Budaya, Struktur Cagar Budaya, Situs Cagar Budaya, dan Kawasan Cagar Budaya di darat dan/atau di air yang perlu dilestarikan keberadaannya karena memiliki nilai penting bagi sejarah, ilmu pengetahuan, pendidikan, agama, dan/atau kebudayaan melalui proses penetapan benda, bangunan, atau struktur dapat diusulkan sebagai Benda Cagar Budaya, Bangunan Cagar Budaya, atau Struktur Cagar Budaya apabila telah berusia 50 tahun atau lebih serta memiliki arti khusus bagi sejarah, ilmu pengetahuan, pendidikan, agama, dan/atau kebudayaan. Berdasarkan kriteria tersebut Candi Brahu yang terdapat di Mojokerto masuk dalam kategori bangunan cagar budaya (Republik Indonesia, 2010).

Candi Brahu merupakan candi agama Buddha dan diperkirakan didirikan abad 15 Masehi berada di Trowulan, Mojokerto. Kini tinggi Candi Brahu yang tersisa adalah  $\pm 20$ m. Dulunya di sekitar Candi Brahu masih terdapat beberapa candi lain, namun sekarang sudah runtuh diantaranya: Candi Muteran, Candi Gedong, Candi Tengah, dan Candi Gentong (Soemanagara, 2014).

Berawal dari masalah candi-candi disekitar Candi Brahu yang runtuh dan hilangnya bagian atas Candi Brahu, sebagai pemegang warisan budaya perlu melakukan pelestarian sebelum warisan yang ada tersebut hilang. Oleh karena itu pada tugas akhir ini penulis akan membuat model 3 dimensi (3D) Candi Brahu. Pemodelan Candi Brahu bertujuan untuk manajemen aset Cagar Budaya Indonesia dengan memanfaatkan teknik fotogrametri rentang dekat dengan bantuan kamera non-metrik. Model 3D yang dihasilkan oleh sepasang foto dua dimensi (2D) secara tumpang tindih bisa digunakan untuk membuat dokumentasi Cagar Budaya tersebut secara cepat, murah, dan teliti.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana hasil kalibrasi kamera pada kamera DSLR dan DSLM yang akan digunakan untuk penelitian?
2. Bagaimana metode fotogrametri rentang dekat digunakan untuk pendokumentasian dengan membuat model 3D Candi Brahu menggunakan kamera DSLR dan DSLM?
3. Bagaimana ketelitian geometrik pada model 3D yang dihasilkan jika dibandingkan dengan koordinat hasil pengukuran *Total Station*?

## **1.3 Batasan Masalah**

Batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Objek Studi dari penulisan Tugas Akhir ini adalah Candi Brahu di Trowulan, Mojokerto.
2. Metode yang dipakai untuk pemodelan Cagar Budaya ini adalah fotogrametri rentang dekat.
3. Pengambilan foto objek adalah dengan metode terestrial.
4. Kamera yang digunakan untuk pemodelan 3D adalah kamera digital non-metrik format kecil, *Digital Single Lens Mirrorless (DSLM)* dan *Digital Single Lens Reflex (DSLR)*.
5. Produk yang dihasilkan adalah model 3D Candi Brahu di Mojokerto.

## **1.4 Tujuan**

Tujuan dari pelaksanaan Tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Mendapatkan parameter orientasi dalam (*IOP*) kamera yang digunakan untuk pemodelan.
2. Membuat model 3D yang digunakan untuk pendokumentasian Candi Brahu dengan metode fotogrametri rentang dekat menggunakan kamera *DSLM* dan *DSLR*.



3. Analisa ketelitian geometrik model berdasarkan perbandingan koordinat pengukuran *Total Station* dengan koordinat model.

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat dari kegiatan aplikatif ini adalah hasil model 3D Candi Brahu diharapkan berguna untuk terjaganya warisan budaya berupa Cagar Budaya Indonesia. Sehingga diharapkan dapat membantu rekonstruksi Candi Brahu apabila terjadi sesuatu yang dapat merubah bentuk dan ukuran di masa yang datang.



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## **BAB II**

### **DASAR TEORI**

#### **2.1 Fotogrametri Rentang Dekat**

Fotogrametri merupakan seni, ilmu pengetahuan dan teknologi untuk memperoleh informasi spasial yang dapat diandalkan tentang fisik benda dan lingkungan melalui proses merekam, mengukur dan interpretasi gambaran fotografik dan pola radiasi energi elektromagnetik yang terekam (Wolf, 1983).

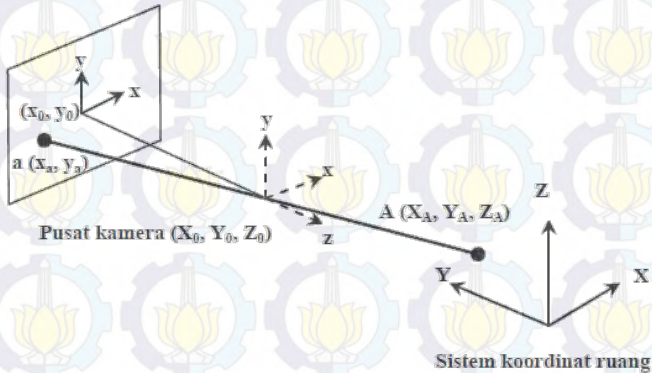
Terminologi Close Range atau Rentang Dekat muncul pada saat teknik ini digunakan untuk objek dengan jarak kurang dari 100 meter dari posisi kamera. Pada teknik CRP pengukuran terhadap suatu objek biasanya dilakukan terhadap hasil perekaman dari beberapa alat sensor. Kamera dan prosedur analisis fotogrametri terestris ini dimulai pada akhir abad ke 19 oleh seorang kolonel Perancis, Laussedat (Atkinson, 1980).

Fotogrametri jarak dekat merupakan fotogrametri non pemetaan. Hal yang membedakan pada konsep fotogrametri jarak dekat dengan fotogrametri pada umumnya adalah obyeknya. Kualitas obyek pada foto ditentukan dari kemampuan kamera yang digunakan. Prinsip dasar dari proses fotogrametri jarak dekat adalah model tiga dimensi (3D) diperoleh dari pengukuran tumpang tindih antar foto dengan sudut pandang yang berbeda dan pengukuran dari orientasi kamera. Kalibrasi pada kamera non metrik dapat di selesaikan dengan bantuan komputerisasi sehingga mengetahui parameter kamera dan lokasi kamera, yang nantinya mendapatkan nilai dari hasil pengukuran orientasi kamera (interior orientation, eksterior orientation, absolut orientation, dan bundle adjustment), (Aulejtner, 2011).

##### **2.1.1. Prinsip Fotogrametri Rentang Dekat**

Pada saat sebuah foto diambil, berkas sinar dari objek akan menjalar menyerupai garis lurus menuju pusat lensa kamera hingga mencapai bidang sensor. Kondisi dimana titik objek pada dunia nyata, titik pusat

proyeksi, dan titik obyek pada bidang foto terletak satu garis dalam ruang dinamakan kondisi kegarisan berkas sinar atau kondisi kolinearitas (collinearity condition). Kondisi ini merupakan syarat fundamental dalam fotogrametri (Atkinson, 1996) seperti terlihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Kondisi Kolinear

(Sumber: Berdasarkan Atkinson, 1996 dalam Wahab, 2009)

Pusat dari sistem koordinat berkas merupakan pusat dari lensa kamera, yang dikenal dengan nama pusat perspektif. 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.  $X_0, Y_0, Z_0$  merupakan titik pusat kamera,  $x_a, y_a, -c$  merupakan koordinat sebuah titik A pada system koordinat berkas, dan  $X_A, Y_A, Z_A$  merupakan koordinat titik A pada sistem koordinat tanah, maka persamaan kolineraritas adalah :

$$\begin{aligned} x_a - x_0 &= -c \left( \frac{r11(XA-XL) + r12(ZA-ZL) + r13(YA-YL)}{r31(XA-XL) + r32(ZA-ZL) + r33(YA-YL)} \right) \\ y_a - y_0 &= -c \left( \frac{r21(XA-XL) + r22(ZA-ZL) + r23(YA-YL)}{r31(XA-XL) + r32(ZA-ZL) + r33(YA-YL)} \right) \end{aligned} \quad \dots(2.1)$$

Dimana

$x_a, y_a$  = Koordinat titik A di foto

$x_0, y_0$  = Koordinat titik utama

$X_A, Y_A, Z_A$  = Koordinat titik A di permukaan bumi

$X_L, Y_L, Z_L$  = Koordinat pusat pemotretan

$c$  = Panjang fokus kamera

$r_{ij}$  = Elemen matriks rotasi

Elemen dari matriks rotasi diberikan pada persamaan.

$$R = R_\omega R_\varphi R_\kappa = \begin{bmatrix} r11 & r12 & r13 \\ r21 & r22 & r23 \\ r31 & r32 & r33 \end{bmatrix} \quad \dots(2.2)$$

Dimana

$$r11 = \cos \varphi \cos \kappa$$

$$r12 = \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa$$

$$r13 = -\cos \omega \sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa$$

$$r21 = -\cos \varphi \sin \kappa$$

$$r22 = -\sin \omega \sin \varphi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa$$

$$r23 = \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa$$

$$r31 = \sin \varphi$$

$$r32 = -\sin \omega \cos \varphi$$

$$r33 = \cos \omega \cos \varphi$$

### 2.1.2. Reseksi Ruang

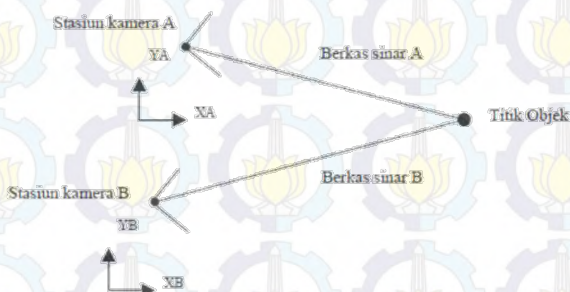
Metode reseksi ruang dengan keseгарisan adalah metode numerik untuk menyelesaikan enam parameter orientasi luar (exterior orientation). Parameter orientasi luar terdiri dari  $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi,$  dan  $\kappa$  merupakan posisi

dan orientasi kamera pada saat pemotretan. Posisi dan orientasi kamera diperlukan untuk menentukan posisi dari titik objek relatif dari sistem koordinat kamera.

Untuk menyelesaikan parameter orientasi luar dibutuhkan minimal 6 persamaan. Oleh karena itu dibutuhkan minimal 3 titik kontrol dimana setiap 1 titik kontrol mendapatkan 2 persamaan, sesuai dengan persamaan (2.1).

### 2.1.3. Interseksi Spasial

Untuk mendapatkan posisi objek pada dunia nyata, maka diperlukan berkas sinar objek yang sama dari foto lainnya (Leitch, 2010). 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, 2000). Prinsip penentuan posisi dari perpotongan sinar ini dikenal dengan interseksi spasial.



Gambar 2. 2 Interseksi Spasial

Sumber: (Leitch, 2010)

## **2.2 Cagar Budaya**

Menurut UU Nomor 11 Tahun 2010 pasal 1 ayat 1, yaitu “Cagar Budaya adalah warisan budaya bersifat kebendaan berupa Benda Cagar Budaya, Bangunan Cagar Budaya, Struktur Cagar Budaya, Situs Cagar Budaya, dan Kawasan Cagar Budaya di darat dan/atau di air yang perlu dilestarikan keberadaannya karena memiliki nilai penting bagi sejarah, ilmu pengetahuan, pendidikan, agama, dan/atau kebudayaan melalui proses penetapan benda, bangunan, atau struktur dapat diusulkan sebagai Benda Cagar Budaya, Bangunan Cagar Budaya, atau Struktur Cagar Budaya” (Republik Indonesia, 2010). Dari pengertian tersebut terdapat beberapa hal yang penting mengenai Cagar Budaya salah satunya yaitu Cagar Budaya perlu dilestarikan.

Cagar Budaya perlu dilestarikan dan dikelola secara tepat melalui upaya perlindungan, pengembangan, dan pemanfaatan dalam rangka memajukan kebudayaan nasional untuk sebesar-besarnya kemakmuran rakyat. Pelestarian Cagar Budaya harus didukung oleh kegiatan pendokumentasian sebelum dilakukan kegiatan yang dapat menyebabkan terjadinya perubahan keasliannya.

Pendokumentasian merupakan upaya pencatatan dan perekaman dalam rangka pelestarian Cagar Budaya pada saat ditemukan atau pada saat didokumentasikan. Mengingat hakikat data yang terbatas itu, maka dalam kegiatan pendokumentasian perlu dilakukan secara terperinci dan menyeluruh informasi Objek Cagar Budaya untuk berbagai keperluan dan kepentingan di masa depan.

Dalam kegiatan pendokumentasian Cagar Budaya itu tercakup dokumentasi secara verbal (deskripsi/narasi) dan dokumentasi secara piktorial (gambar, foto, dan video) pada semua jenis Objek Cagar Budaya baik berupa benda, bangunan, struktur, situs, maupun kawasan (Anonim, 2013).

Salah satu Cagar Budaya Indonesia yang berada di Jawa Timur adalah Candi Brahu. Candi ini terletak di Kecamatan

Trowulan, Mojokerto. Sebagaimana umumnya bangunan purbakala di Trowulan, Candi Brahu juga dibuat dari bahan bata, menghadap ke arah barat. Denahnya berbentuk bujur sangkar ukuran 18 x 22.50 meter dan tinggi yang tersisa sampai sekarang  $\pm 20$  meter (Rohmani, dkk., 1995).

### 2.3 Kamera

Kamera merupakan instrumen yang sangat penting dalam fotogrametri. Kamera ini digunakan sebagai alat perekam foto objek dalam fotogrametri. Ketelitian geometri foto yang tinggi ditentukan oleh kualitas kamera yang dipakai saat merekam objek. Dalam fotogrametri kamera diklasifikasikan menjadi dua kategori umum, yaitu:

#### a. Kamera metrik

Kamera metrik merupakan kamera yang dirancang khusus untuk keperluan fotogrametri. Kamera ini terkalibrasi secara menyeluruh dan stabil sebelum digunakan, yang meliputi panjang fokus, koordinat titik utama foto, distorsi radial dan distorsi tangensial lensa. Kamera metrik berformat normal dikenal dengan tiga bukaan sudut (*angle field of view*), yaitu: (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 dirancang dengan panjang fokus tetap untuk objek yang tak terhingga.

#### b. Kamera non-metrik

Kamera non-metrik dirancang untuk merekam foto profesional maupun pemula. Dengan kamera ini kualitas visual foto lebih diutamakan daripada kualitas geometrinya. Kamera non-metrik mempunyai dua kekurangan utama, yaitu:



i. Ketidakstabilan geometrik

Masalah terbesar penggunaan kamera non metrik adalah ketidakstabilan geometrik. Kamera non metrik tidak memiliki tanda-tanda fidusial, 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, sehingga 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 (ukuran sensor *full frame*: 36 mm x 24 mm). membutuhkan jumlah foto lebih banyak dibandingkan jika pemotretan itu dilakukan dengan menggunakan kamera metrik format 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.

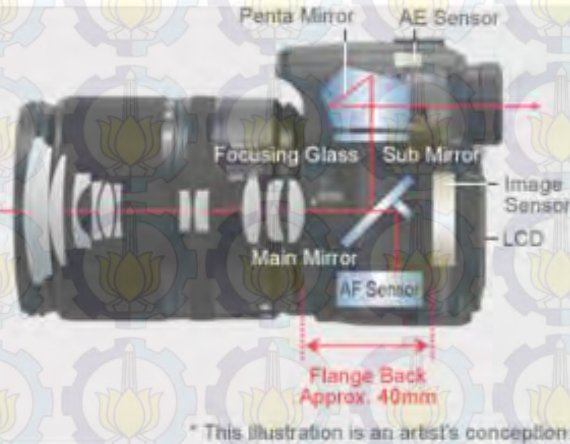
Semakin berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi keterbatasan-keterbatasan penggunaan kamera format kecil dapat diatasi, sehingga kamera non metrik menjadi instrumen yang layak digunakan untuk keperluan fotogrametri.

Kamera non-metrik jika dilihat dari sisi keuangan, tentu saja lebih ekonomis dibanding kamera metrik. Selain itu jenis kamera non-metrik di pasaran bervariasi, antara lain kamera saku, kamera *pro summer*, kamera *DSLR* dan kamera *DSLM*.

2.3.1. Kamera *DSLR*

*Digital Single Lens Reflex (Digital SLR* atau *DSLR*) adalah kamera digital yang menggunakan

sistem cermin otomatis dan pentaprisma atau pentamirror untuk meneruskan cahaya dari lensa menuju ke viewfinder. Berikut adalah gambaran struktur pada kamera *DSLR* (Syndicate, 2011).



Gambar 2. 3 Struktur dari kamera *DSLR*  
(Sumber: Panasonic Corporation, 2008)

Cara kerja kamera *DSLR* dibagi menjadi tiga proses, yaitu saat membidik objek, saat memotret dan proses yang terjadi di sensor (Anonim, 2013). Berikut adalah penjelasannya:

- Saat kita mengintip di lobang *viewfinder* dibelakang kamera, apapun yang kelihatan disitu adalah apa yang akan menjadi hasil akhir foto. Pantulan cahaya dari obyek foto masuk melewati lensa lalu menuju cermin pantul yang kemudian memantulkan cahaya tersebut ke pentaprisma. Pentaprisma mengubah cahaya vertikal ke horisontal dengan mengarahkan cahaya menuju dua cermin terpisah, lalu masuk ke *viewfinder*.
- Saat kita memotret, cermin pantul/*reflex mirror* berayun keatas dan membiarkan cahaya terus maju

dengan lurus. *Shutter* kemudian membuka sehingga cahaya tadi masuk ke sensor digital. *Shutter* tetap akan terbuka selama waktu *shutter speed* yang ditentukan dan sensor akan terus merekam informasi cahaya. Kalau sudah selesai, maka *reflex mirror* akan kembali ke posisi awal sehingga cahaya dari lensa akan terpantul keatas dan kembali muncul di *viewfinder*.

- Proses ketiga adalah proses yang terjadi di sensor digital dimana gambar diolah oleh komputer (*processor*) didalam kamera. *Processor* akan mengambil informasi yang terekam di sensor, mengubahnya menjadi menjadi format yang sesuai lalu menuliskannya ke dalam *memory card*.

Kamera *DSLR* memiliki keunggulan dalam hal ukuran sensornya yang jauh lebih besar dibanding kamera digital non-metrik biasa. Hal ini kamera ukuran sensor dibuat menyamai ukuran film analog 35mm atau yang dikenal dengan sebutan *full frame* (36x24mm). Selain memakai sensor berukuran 35mm, kamera *DSLR* juga tersedia dengan sensor yang berukuran lebih kecil. Tujuannya adalah untuk menekan biaya produksi dan membuka kesempatan memproduksi lensa khusus yang bisa dibuat lebih kecil dan dengan biaya yang lebih murah (Syndicate, 2011).

Sensor yang lebih kecil dari sensor full frame biasa disebut dengan *crop-sensor*, karena gambar yang dihasilkan tidak lagi memiliki bidang gambar yang sama dengan focal lensa yangdigunakan. Hal ini biasa disebut dengan *crop factor*, dinyatakan dengan *focal length multiplier*, suatu faktor pengali yang akan membuat panjang fokus lensa yang digunakan akan terkoreksi sesuai ukuran sensor. Perkalian ini akan menaikkan panjang fokus efektif dari panjang fokus lensa yang dipakai sehingga hasil foto yang diambil

dengan sensor *crop* ini akan mengalami perbesaran (*magnification*). Semakin kecil sensornya maka semakin tinggi *crop factor*-nya dan semakin besar perbesaran gambarnya.

### 2.3.2. Kamera *DSLM*

*Digital Single Lens Mirrorless (DSLM)* merupakan teknologi baru pada kamera dimana didapat dengan membuang cermin yang ada di DSLR (Novianty, 2015). Konsekuensinya adalah menghemat ukuran dan berat kamera (serta menghemat harga), namun kita kehilangan *optical viewfinder*, oleh karena itu kamera *mirrorless* menggunakan sistem *viewfinder* elektronik (EVF – *electronic viewfinder*). Kualitas foto kamera *mirrorless* juga tidak kalah dengan *DSLR* karena ukuran sensor yang relatif sama. Cahaya yang melalui lensa ditangkap oleh sensor dan langsung tampil di LCD (Anonim, 2014).



Gambar 2. 4 Perbedaan kamera *DSLR* (kiri) dan *DSLM* (kanan)

(Sumber: Panasonic Corporation, 2008)

Kamera *DSLM* muncul pertama kali pada tahun 2004 dengan diluncurkannya Epson RD-1. Kemudian

diikuti oleh Leica pada tahun 2006. Pada tahun tersebut Leica yang merupakan produsen kamera asal Jerman meluncurkan kamera jenis *mirrorless* Leica M8. Hanya saja Leica meluncurkan M8 dengan pasar khusus karena Leica memakai sensor besar dan dijual dengan harga yang sangat tinggi. Kamera digital jenis ini mulai semakin berkembang pesat untuk harga yang relatif lebih rendah pada sekitar tahun 2008. Saat itu Panasonic mengembangkam sistem Micro Four Thirds dengan produk pertama adalah kamera Panasonic Lumix DMC-G1, yang dirilis di Jepang pada Oktober 2008.

#### **2.4 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.

Dalam fotogrametri akurasi objek yang dihasilkan tergantung pada kalibrasi kamera. Kalibrasi kamera dilakukan untuk menentukan parameter internal kamera (IOP) meliputi *principal distance* ( $f$ ), 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 (*skew*) (Fraser, 1997).

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.

Salah satu metode yang dipakai untuk kalibrasi kamera adalah *self-calibration*. Pada *self-calibration* pengukuran titik-titik target pada objek pengamatan digunakan sebagai data untuk penentuan koordinat titik objek dan parameter exterior orientasi dari kamera sekaligus untuk menentukan parameter kalibrasi kamera (Atkinson, 1996).

Dalam 3D *computer vision* teknik ini dilakukan hanya dengan mengambil beberapa foto statik *scene* dengan posisi kamera yang berpindah pindah. Foto diambil dengan kamera yang sama dan dengan pengaturan yang sama pula. Korespondensi antara tiga gambar cukup untuk mendapatkan parameter internal dan eksternal yang memungkinkan kita untuk merekonstruksi 3D.

Saat ini untuk *self-calibration* telah berkembang sebuah teknik yang fleksibel untuk memudahkan dalam kalibrasi kamera. Teknik ini hanya membutuhkan kamera untuk mengamati *planar pattern* dari dua atau lebih orientasi yang berbeda. Bisa dengan menggerakkan posisi kamera atau *planar pattern* untuk mendapatkan perbedaan orientasi (Zhang, 2000). Teknik ini kini diadopsi pada aplikasi Camera Calibration Apps milik Mathworks dalam perangkat lunak Matlab.

Algoritma kalibrasi yang digunakan mengasumsikan model kamera *pinhole*:

$$w[x \quad y \quad 1] = [X \quad Y \quad Z \quad 1] \begin{bmatrix} R \\ t \end{bmatrix} K \quad \dots(2.3)$$

Dari persamaan di atas diketahui (X,Y,Z): koordinat di lapangan, (x,y): koordinat foto dimana kedudukan titik foto dalam piksel, w: faktor skala koordinat yang sama, dan K: matriks intrinsik kamera yang didefinisikan sebagai:

$$\begin{bmatrix} fx & 0 & 0 \\ s & fy & 0 \\ cx & cy & 1 \end{bmatrix} \quad \dots(2.4)$$

Koordinat (cx,cy) merepresentasikan titik tengah optik (*optical center*) dalam piksel, s adalah *skew* parameter ketika sumbu x dan sumbu y tegak lurus, s bernilai 0, fx adalah panjang fokus lensa

terhadap  $x$  piksel sedangkan  $f_y$  panjang fokus lensa terhadap  $y$  piksel.

#### 2.4.1. Distorsi Radial

Menurut ASP (1980) dalam Wigrata (1986) distorsi radial adalah pergeseran linier titik foto dalam arah radial terhadap titik utama dari posisi idealnya. Distorsi radial menyebabkan posisi gambar mengalami distorsi sepanjang garis radial dari titik utama.

Koefisien distorsi radial memodelkan tipe dari distorsi yang dimiliki. Persamaan untuk mencari koefisien distorsi radial ( $k_1, k_2, k_3$ ) adalah sebagai berikut (Zhang, 2000):

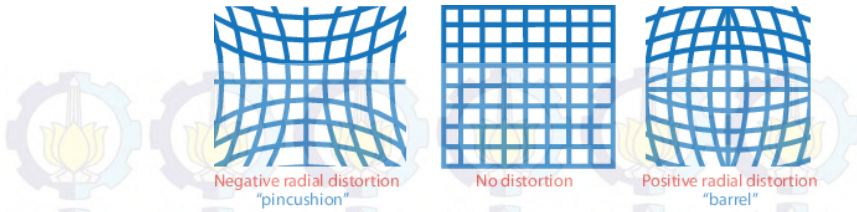
$$\begin{aligned}x_{\text{distorted}} &= x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \\y_{\text{distorted}} &= y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \dots(2.5)\end{aligned}$$

dimana

$(x_{\text{distorted}}, y_{\text{distorted}})$  = Titik yang terdistorsi  
 $(x, y)$  = Lokasi Titik tidak terdistorsi pada koordinat foto normalisasi

$k_1, k_2, k_3$  = koefisien distorsi lensa  
 $r^2$  =  $x^2 + y^2$

Distorsi radial ke arah luar dianggap positif dan distorsi radial ke arah dalam dianggap negatif seperti terlihat pada gambar



Gambar 2. 5 Ilustrasi distorsi radial  
(Sumber: Mathworks, 2015)

Model distorsi seperti pada Gambar 2.4 dapat diketahui dengan menghitung fungsi distorsi lensa  $f(r)$  berdasarkan fungsi polinomial berikut (Hugemann, 2010):

$$f(r) = 1 + k_1 r + 2r^2 + k_1 r^3 \quad \dots(2.6)$$

dimana  $k_1$ ,  $k_2$ , dan  $k_3$  adalah koefisien distorsi radial. Sedangkan  $r$  adalah jarak radial titik pada foto terdistorsi dari titik utama (*principal point*). Keadaan dimana lensa mempunyai *barrel distortion* jika  $f(r) < 1$ . Sebaliknya untuk *pincushion distortion*, terjadi jika  $f(r) > 1$ .

#### 2.4.2. Distorsi Tangensial

Distorsi tangensial adalah pergeseran linear titik foto pada arah normal (tegak lurus) garis radial melalui titik foto tersebut. Distorsi tangensial terjadi karena kesalahan dalam mengatur titik pusat lensa pada gabungan lensa (sentering) (Wolf, 1983).

Persamaan untuk mencari koefisien distorsi tangensial ( $p_1$ ,  $p_2$ ) adalah sebagai berikut (Zhang, 2000):

$$\begin{aligned} x_{\text{distorted}} &= x + [2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \\ y_{\text{distorted}} &= y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy] \end{aligned} \quad \dots(2.7)$$



dimana

$(x_{\text{distorted}}, y_{\text{distorted}})$  = Titik yang terdistorsi

$(x, y)$  = Lokasi Titik tidak terdistorsi pada koordinat foto normalisasi

$K_1, k_2, k_3$  = koefisien distorsi lensa

$r^2$  =  $x^2 + y^2$

## 2.5 Pemodelan 3 Dimensi

Model 3D dalam komputer grafis merupakan representasi secara matematis dari objek 3D yang dalam pembuatannya dibantu perangkat lunak khusus pemodelan 3D. (Yilmaz, dkk., 2008) Proses menampilkan model 3D sebagai gambar dua dimensi disebut *e-3D render* atau menggunakan simulasi komputer dalam menampilkan model fisiknya (Yilmaz, 2000).

Model 3D yang dapat dibentuk terdiri dari:

### a. *Dense Point Cloud Model*

Model tiga dimensi (3D) ini dibentuk dari *point clouds* yang dihasilkan oleh foto stereo secara otomatis, di proses secara komputerisasi dengan menggunakan prinsip interseksi spasial. Pembuatan *point clouds* terkadang tidak sesuai, sehingga perlunya pemilihan data *point clouds* yang sesuai dengan kerapatan yang diinginkan dan keaslian bentuk obyek.

### b. *Surface (Meshing Point) Model*

Rekonstruksi *surface* pada pemodelan 3D berasal dari *point cloud* yang dihasilkan pada tahapan sebelumnya. Poligon pada permukaan objek terbentuk berdasarkan titik-titik *dense point cloud*. Poligon-poligon tersebut membentuk segitiga yang bergabung satu sama lain, sehingga membentuk suatu permukaan objek yang solid. *Faces/surface* pada *Agisoft PhotoScan* merupakan suatu permukaan yang terbentuk dari poligon, sedangkan *Vertex* merupakan titik-titik perpotongan antar poligon yang terbentuk dari minimal tiga atau lebih *faces/surface*.

### c. *Texturing Model*

Tekstur pada permukaan objek dapat terbentuk dengan cara memanggil tekstur dari foto aslinya atau memberikan tekstur yang tersedia dalam *software* pengolahan data. Pemetaan tekstur sendiri adalah proses desain grafis dimana gambar permukaan 2 dimensi melilit atau berada pada objek 3 dimensi.

## 2.6 Desain Kekuatan Jaringan

*Strength of figure* adalah kekuatan dari bentuk kerangka yang digunakan untuk menentukan kekuatan kerangka dari jaringan geodesi menggunakan gambar, di mana kekuatannya akan setara dengan kerangka yang akan dibuat di lapangan. Nilai *strength of figure* dipengaruhi oleh penentuan posisi dan jumlah GCP yang digunakan, dimana hal ini akan menentukan ketelitian kerangka tersebut. Kekuatan geometrik dicerminkan dengan harga *strength of figure* yang paling kecil, hal ini akan menjamin ketelitian yang merata pada seluruh jaringan. Sehingga dapat dipilih bentuk geometri yang baik (kuat dan kesalahan minimum). Cara yang digunakan untuk mengetahui kekuatan jaringan tersebut adalah dengan mencari salah satu kemungkinan yang didapat dengan metode kuadrat terkecil (*leasts quare*).

Pada hitung perataan kuadrat terkecil metode parameter, persamaan pengamatan suatu vektor *baseline* yang lepas dapat dituliskan dalam bentuk persamaan vektor sebagai berikut (Abidin, 2002):

$$V + B = X_B + X_A \quad \dots(2.8)$$

Dimana B adalah data ukuran vektor *baseline* yang merupakan hasil dari perhitungan *baseline* dan merupakan parameter yang dicari. Dalam formulasi matriks dapat ditulis juga sebagai berikut:

$$V = [-11] \cdot \begin{bmatrix} X_B \\ X_A \end{bmatrix} - B \quad \dots(2.9)$$

I merupakan matriks identitas berdimensi (3x3), dan dapat diuraikan kembali dalam formulasi berikut:

$$\begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \\ X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} dX_{AB} \\ dY_{AB} \\ dZ_{AB} \end{bmatrix} \quad \dots(2.10)$$

Adapun formulasi umum yang digunakan persamaan pengamatan dari hitung perataan parameter:

$$V = AX - L \quad \dots(2.11)$$

Dimana V adalah vektor residu, A adalah matriks desain, X adalah vektor parameter, dan L adalah vektor pengamatan. Sedangkan untuk suatu vektor *baseline* yang terikat, dimana salah satu titik ujungnya merupakan titik kontrol dan  $X_A$  sudah diketahui harganya, maka persamaan pengamatannya menjadi seperti berikut:

$$\begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_A + dX_{AB} \\ Y_A + dY_{AB} \\ Z_A + dZ_{AB} \end{bmatrix} \quad \dots(2.12)$$

Adapun solusi kuadrat terkecil untuk koordinat titik-titik dalam jaringan adalah:

$$\begin{aligned} X &= [A^T P A]^{-1} \cdot A^T P F \\ P &= Q_L^{-1} = \sigma^2 \cdot C_L^{-1} \end{aligned} \quad \dots(2.13)$$

Dimana:

$P$  = matriks berat dari pengamatan

$Q_L$  = matriks kofaktor pengamatan

$\sigma^2$  = faktor variansi apriori

$Q_L$  = matriks variansi kovariansi (VCV) pengamatan

Geometri dari suatu jaringan dapat dikarakterisir dengan beberapa parameter, seperti jumlah dan lokasi titik dalam jaringan (termasuk titik tetap), jumlah *baseline* dalam jaringan (termasuk *common baseline*), konfigurasi *baseline* dan *loop*, serta konektivitas titik dalam jaringan (Abidin, 2002). Kekuatan geometri jaringan akan sangat tergantung pada karakteristik yang diadopsi dari parameter-parameter tersebut. Sehingga kekuatan jaring diformulasikan sebagai berikut:

$$SOF = \frac{\text{trace}(A^T \cdot A)^{-1}}{u} \quad \dots(2.14)$$

Rumus diatas merupakan rumus untuk menghitung kekuatan jaring, dengan matriks desain (A) dan ukuran lebih (u) yang diperoleh dari jumlah ukuran dikurangi jumlah parameter (Anjasmara, 2005).

### **2.7 Ground Sample Distance (GSD)**

*GSD* adalah nilai ukuran terkecil yang mampu terekam dalam satu piksel (Harintaka, 2012). Hitungan untuk memperoleh nilai *GSD* didapat melalui persamaan berikut.

$$GSD = SPS \times \frac{D}{f} \quad \dots(2.15)$$

Dimana:

*GSD* = *Ground Sample Distance*

*SPS* = *Sensor Pixel Size*

D = jarak objek ke kamera  
 f = focal length

## 2.8 Root Mean Square Error (RMSE)

*RMSE* atau yang dikenal dengan *RMS residual* adalah nilai perbedaan antara nilai sesungguhnya dengan nilai hasil ukuran (ESRI, 2006). *RMSE* merupakan ukuran akurasi dari suatu prediksi besaran. Semakin besar nilai *RMSE*, maka semakin besar kesalahan hasil ukuran terhadap nilai yang dianggap benar. *RMSE* didapatkan dari nilai akar kuadrat pembagian total selisih ukuran kuadrat dengan jumlah ukuran yang digunakan.

Berikut adalah persamaan untuk menghitung *RMSE*.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2}{n}} \quad \dots(2.16)$$

Dimana:

*RMSE* = Root Mean Square Error  
 $X_{1,i}$  = nilai yang dianggap benar  
 $X_{2,i}$  = nilai hasil ukuran  
 n = banyak ukuran yang digunakan

## 2.8 Uji Statistik t-test

Uji statistik t-test berpasangan adalah salah satu metode pengujian hipotesis dimana data yang digunakan tidak bebas (berpasangan). Ciri-ciri yang paling sering ditemui pada kasus yang berpasangan adalah satu individu (objek penelitian) dikenai 2 buah perlakuan yang berbeda. Walaupun menggunakan individu yang sama, peneliti tetap memperoleh 2 macam data sampel, yaitu data dari perlakuan pertama dan data dari perlakuan kedua. Perlakuan pertama mungkin saja berupa kontrol, yaitu

tidak memberikan perlakuan sama sekali terhadap objek penelitian.

Uji statistik t-test merupakan teknik analisis untuk membandingkan satu variabel bebas. Uji statistik t-test digunakan untuk menguji apakah nilai tertentu berbeda secara signifikan atau tidak dengan rata-rata sebuah sampel. Uji t-test digunakan untuk uji statistik sampel kecil ( $n < 30$ ).

$$\begin{aligned}x_1 &= \mu - ((t_n, 1/2\alpha * \sigma_v)/\sqrt{n}) \\x_2 &= \mu + ((t_n, 1/2\alpha * \sigma_v)/\sqrt{n})\end{aligned}\dots(2.17)$$

Rumus diatas digunakan untuk uji t-test, dengan nilai pengukuran batas bawah ( $x_1$ ), nilai pengukuran batas atas ( $x_2$ ), rata-rata pengukuran ( $\mu$ ), level of significance ( $\alpha$ ), simpangan baku ( $\sigma$ ) dan n merupakan jumlah sampel (Blank, 1982).

Secara statistik dinyatakan bahwa  $H_0$  diterima apabila hasil perhitungan berada pada  $-t < X < t$  dengan derajat kebebasan tertentu.

Analisis data secara kualitatif menurut Suharsimi Arikunto (2010) dilakukan dengan memanfaatkan prosentase yang dinyatakan dalam sebuah predikat yang menunjuk pada pernyataan keadaan, ukuran kualitas. Berdasarkan perhitungan persentase diterimanya hipotesa nol dikategorikan ke dalam lima kategori kualitas sebagai berikut (Arikunto, 2010).

Tabel 2. 1 Kategori kualitas diterimanya hipotesa nol

<b>Persentase</b>	<b>Kategori</b>
0-20%	tidak baik
21-40%	kurang baik
41-60%	cukup
61-80%	baik
81-100%	sangat baik

## **2.9 Penelitian Terdahulu**

Penelitian terdahulu terkait pemodelan 3D objek dengan fotogrametri rentang dekat adalah sebagai berikut.

- Putera (2013) dalam penelitiannya yang berjudul “Kalibrasi Kamera Non-metrik Digital dengan Metode *Self Calibration*”. Kamera non metrik yang digunakan yaitu Canon IXUS 115HS dengan resolusi 12 megapiksel dan panjang fokus yang digunakan 11mm. Metode kalibrasi yang digunakan yaitu *Self Calibration*. Perbandingan akurasi yang dihasilkan diketahui berdasar pergeseran titik hasil proyeksi terhadap *Ground Control Point (GCP)* yang terukur di lapangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dalam proses kalibrasi menghasilkan parameter eksternal yang stabil, karena dalam proses iterasi yang keempat hingga seterusnya nilai yang dihasilkan tidak berubah. Distorsi hasil proyeksi arah pergeserannya mendekati posisi ideal serta nilai *reprojection error* tidak melebihi 0.5mm dari bacaan maksimal mistar 1mm. Parameter internal tidak menghasilkan nilai yang stabil karena dalam setiap proses iterasinya nilainya selalu berubah, panjang fokus terkalibrasi mengalami perubahan signifikan sebesar -99mm dari nilai acuan 11mm, dan nilai parameter external terkalibrasi berbeda jauh dari nilai awal yang diberikan.
- Jantra (2014) dalam penelitiannya yang berjudul “Pembuatan Model Tiga Dimensi Candi Gebang Menggunakan Metode Fotogrametri Jarak Dekat”. Pemodelan tiga dimensi digunakan untuk pendokumentasian Cagar Budaya, Candi Gebang. Metode yang digunakan adalah fotogrametri rentang dekat dengan menggunakan kamera non-metrik jenis *DSLR*. Hasil akhir dari penelitian ini adalah model 3 dimensi dari Candi Gebang yang mempunyai koordinat tiga dimensi sesuai di lapangan. Pengujian dari model tiga dimensi, dilakukan dengan cara membandingkan koordinat model dengan

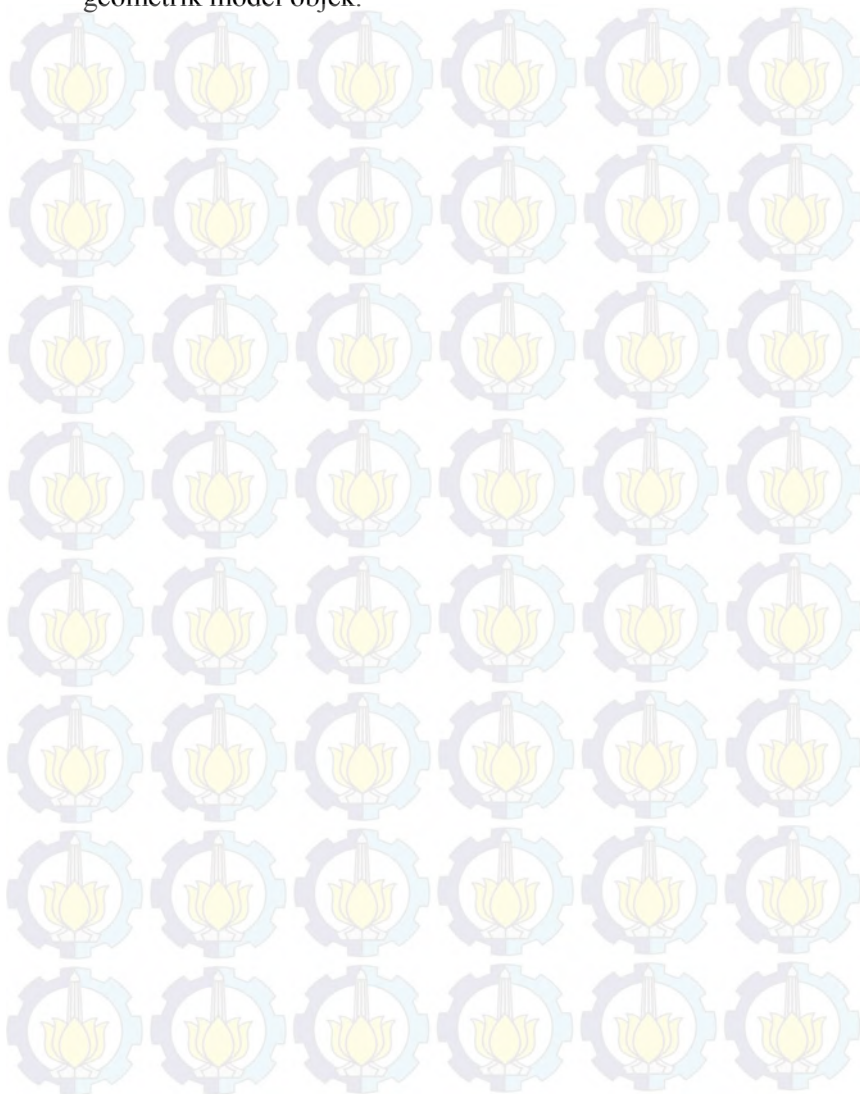
koordinat tanah, yaitu menggunakan koordinat *Independent Check Point (ICP)* dengan kesalahan rata-rata adalah 0,001 meter, dimana nilai *Ground Sampling Distance (GSD)* adalah 1,26mm.

- Wahab (2009) dalam penelitiannya yang berjudul “Analisis Geometri Data Objek Tiga Dimensi Menggunakan Fotogrametri Rentang Dekat, *Terrestrial Laser Scanning*, Dan *Electronic Total Station (ETS)*”. Data yang digunakan untuk pemodelan objek 3D adalah data Fotogrametri Rentang Dekat, *Terrestrial Laser Scanner*, dan *Electronic Total Station (ETS)*. Data yang dianggap benar adalah data dari *Total Station* berdasarkan spesifikasi alat, perambatan kesalahan dan cara pengambilan data. Berdasarkan nilai RMS residual dapat ditentukan tingkat akurasi dari data koordinat titik cek. Dari hasil perbandingan antara *Total Station* dengan Fotogrametri Rentang Dekat diperoleh nilai RMS residual terbesar pada komponen X pada data pertama sebesar 0.944925 piksel dengan residual tersebar adalah 3.604411441 piksel. Sedangkan hasil perbandingan antara *Total Station* dengan *Terrestrial Laser Scanner* diperoleh RMS residual terbesar pada komponen Z. Sedangkan dari perbandingan jarak diperoleh kecenderungan selisih jarak akan semakin baik apabila jarak yang di ukur semakin besar, rata-rata selisih jaraknya nya sebesar 0.12175 cm

Adapun penelitian yang akan dilakukan adalah pemodelan 3 dimensi objek Cagar Budaya Indonesia, yaitu Candi Brahu yang terletak di Trowulan, Mojokerto. Metode yang dilakukan dalam pemodelan objek tersebut adalah dengan fotogrametri rentang dekat. Kamera yang digunakan adalah kamera non-metrik jenis *DSLM* dan *DSLR*. Kalibrasi kedua kamera tersebut menggunakan metode *self-calibration*. Data pengukuran *Total Station*



digunakan sebagai data yang dianggap benar untuk menganalisa geometrik model objek.



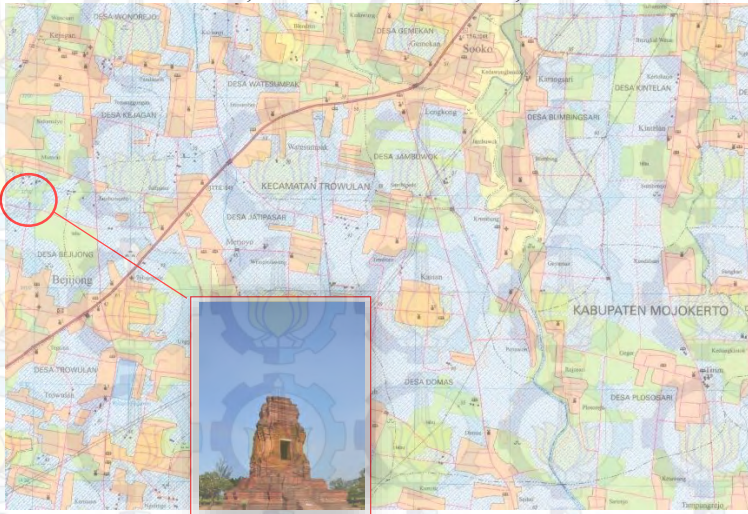


“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## BAB III METODOLOGI

### 3.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Candi Brahu di Dusun Bejjong, Desa Bejjong, Kecamatan Trowulan, Kabupaten Mojokerto pada koordinat  $07^{\circ} 32' 34,9''$  LS dan  $112^{\circ} 22' 23,2''$  BT.



Gambar 3. 1 Lokasi Candi Brahu  
(Sumber: Peta RBI Lembar A1508-344)

### 3.2 Data dan Peralatan

Data yang diperlukan dalam penelitian ini adalah:

- Data koordinat titik BM sebagai titik referensi pengukuran kerangka kontrol, GCP dan ICP.
- Foto-foto *checkerboard* untuk membantu kalibrasi kamera.
- Foto-foto Candi Brahu dengan resolusi 24 megapiksel dari berbagai sudut pandang untuk pembuatan model 3D objek.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya :

## a. Perangkat Keras

- ✓ Kamera DSLM Sony Alpha 6000



Gambar 3. 2 Kamera Sony Alpha 6000  
(Sumber: Sony Corporation, 2014)

Tipe sensor	: CMOS
Efektif Megapiksel	: 6000 x 4000
Format Sensor	: APS-C
Ukuran Sensor	: 366,6mm <sup>2</sup> (23,50mm x 15,6mm)
Ukuran sensor/piksel	: (0,00392mm x 0,0039mm)

- ✓ Kamera DSLR Nikon D3200



Gambar 3. 3 Kamera DSLR Nikon D3200

(Sumber: Nikon Corporation, 2012)

Tipe Sensor	: CMOS
Efektif Megapiksel	: 6016 x 4000
Format Sensor	: APS-C
Ukuran Sensor	: 357,28mm <sup>2</sup> (23,20mm x 15,40mm)
Ukuran sensor / piksel	: (0,00391mm x 0,00385mm)

✓ *Total Station* TOPCON GT235N OL3263



Gambar 3. 4 TOPCON GL235N OL3263  
(Sumber: Topcon Positioning System, 2016)

Panjang Teropong	: 150 mm
Diameter Lensa Objektif	: 45 mm ( EDM : 50mm )
Perbesaran	: 30 x
Jarak Fokus Minimum	: 1,3 meter
Pengukuran Jarak	: 3.000 m
Akurasi Jarak	: ± ( 2mm + 2 ppmxD)

Akurasi Sudut : 5"  
Bacaan Sudut Minimal : 1" / 5"

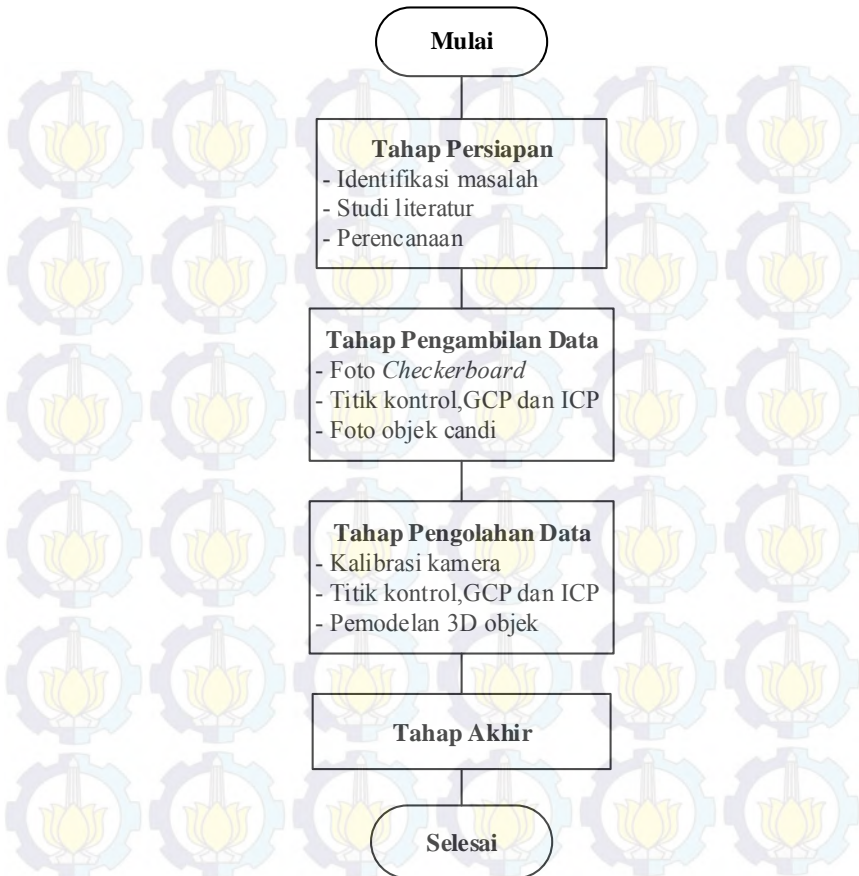
- ✓ Laptop untuk pengolahan data
- ✓ Mistar *glass* untuk pengukuran jarak antar titik *grid corner*
- ✓ Printer untuk percetakan laporan

b. Perangkat Lunak

- ✓ *Software* pengolahan *image* untuk pemodelan 3D.
- ✓ Camera Calibrator Apps Matlab untuk kalibrasi kamera
- ✓ *Software 3D compare* untuk membandingkan model 3D
- ✓ Microsoft office untuk pengolahan data dan pembuatan laporan

### **3.3 Metodologi Penelitian**

Secara umum tahapan pelaksanaan penelitian yang akan dilakukan adalah terlihat pada diagram alir Gambar 3.2 sebagai berikut.



Gambar 3. 5 Diagram alir tahapan penelitian

a. Tahap Persiapan

Tahapan Persiapan pada penelitian ini terdiri dari:

- Identifikasi Masalah  
Identifikasi masalah pada penelitian ini adalah mengidentifikasi masalah berdasarkan latar belakang penelitian, rumusan masalah dan tujuan dilakukannya penelitian ini.

- Studi Literatur  
*Sebagai lanjutan dari identifikasi masalah, Studi Literatur merupakan tahapan* dimana penulis mempelajari metode-metode yang terkait untuk menyelesaikan masalah berdasarkan literatur yang berasal dari buku, jurnal, seminar ilmiah, *website* dan lainnya.
  - Perencanaan  
Setelah mempelajari metode-metode yang terkait untuk menyelesaikan masalah, maka dilakukan perencanaan. Pada tahapan ini dilakukan pemilihan metode, penentuan alat yang dibutuhkan dan waktu pengambilan data.
- b. Tahap Pengambilan Data
- Tahapan Pelaksanaan pada penelitian ini adalah pengambilan data yang terdiri dari:
- Kalibrasi kamera  
Disini dilakukan pengambilan foto bidang kalibrasi dengan kamera *DSLM* dan *DSLR*.
  - Penentuan *GCP* dan titik kontrol  
Untuk menentukan *GCP* dilakukan pengukuran dengan GPS geodetik sebagai titik bench mark pengukuran sehingga koordinat objek dapat diikatkan pada koordinat global. Sedangkan untuk penentuan titik kontrol menggunakan *Total Station*. Titik kontrol digunakan untuk menganalisa ketelitian geomtrik foto.
  - Pemotretan Objek  
Pemotretan objek dilakukan dengan metode fotogramteri rentang dekat dengan menggunakan kamera *DSLM* dan *DSLR*. Metode yang digunakan pada saat pengambilan foto objek adalah fotogrametri terestris. Skala yang diharapkan dari pengukuran ini



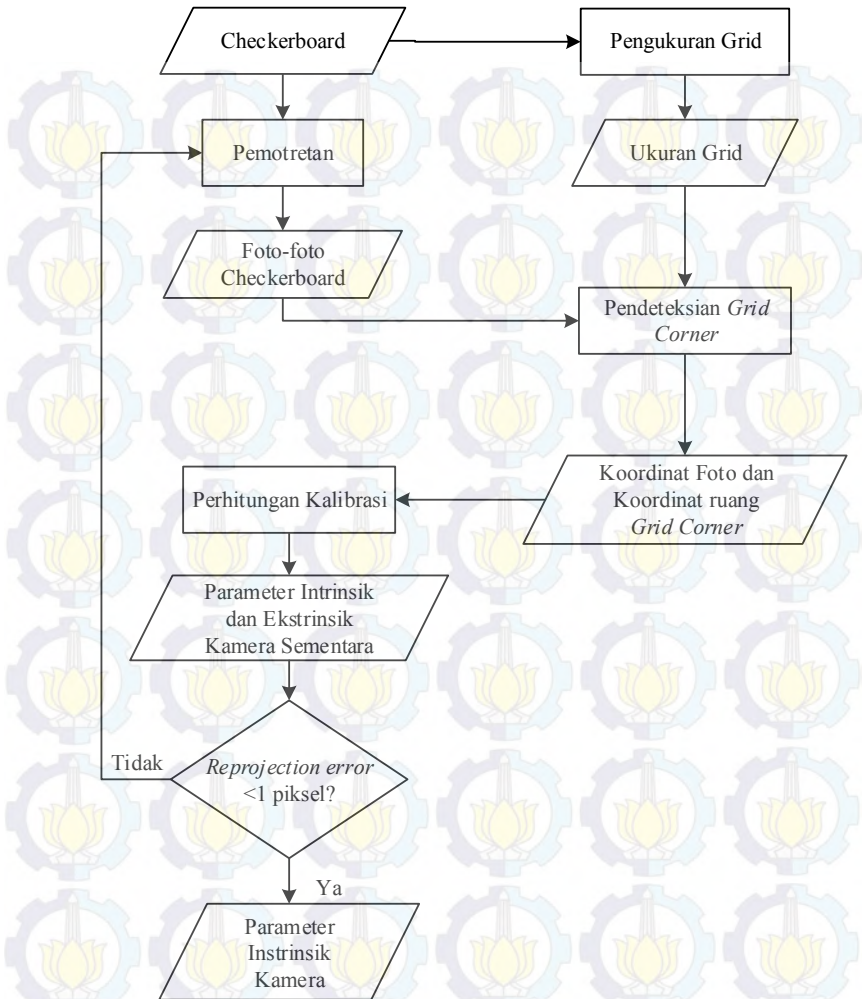
adalah 1:2000 sehingga pemotretan objek dilakukan dengan jarak  $\pm 36$  m dan pengaturan *focal length* 18mm.

c. Tahap Pengolahan Data

Tahapan Pengolahan Data pada penelitian ini terdiri dari:

- Kalibrasi Kamera

Proses kalibrasi kamera dengan metode *self-calibration* menggunakan *software* Matlab terlihat pada diagram alir berikut.

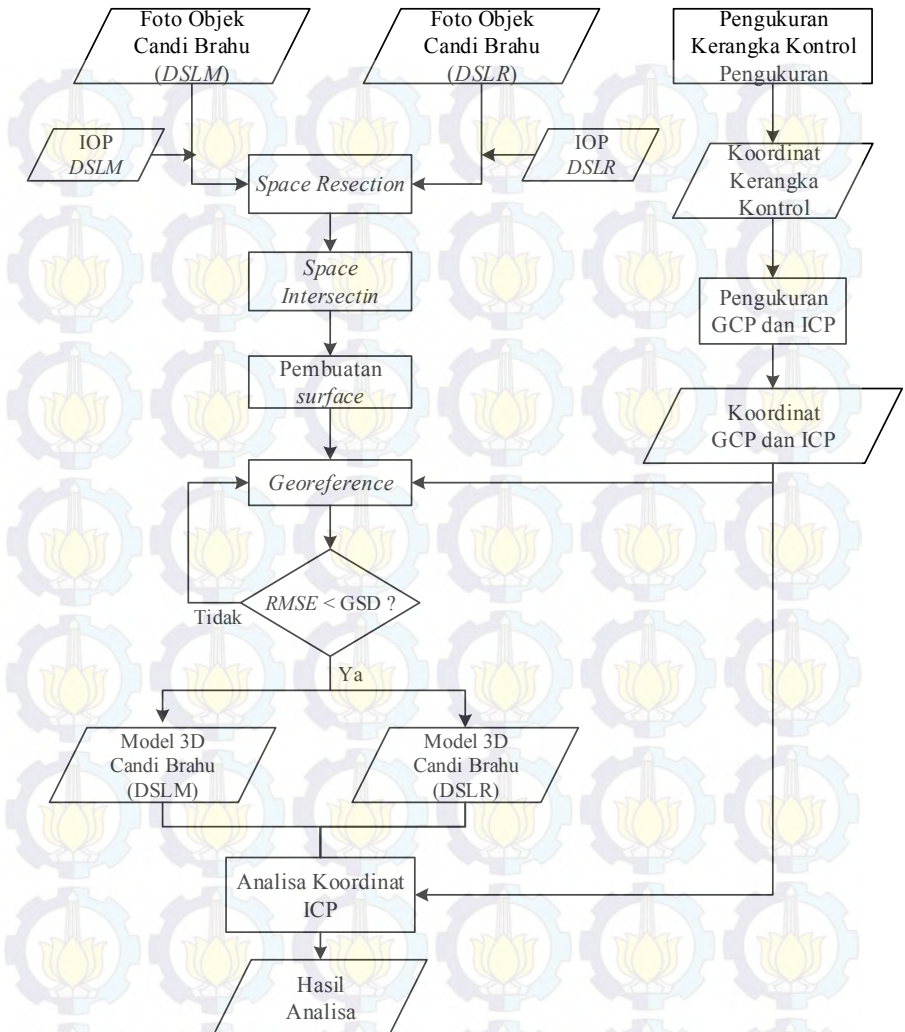


Gambar 3. 6 Diagram alir kalibrasi kamera

Pada tahap ini dilakukan berbagai kegiatan sebagai berikut :

- a. Pencetakan bidang *checkerboard* pada kertas A1 (594 x 841 mm)

- b. Mengukur jarak antar *grid corner* pada bidang *checkerboard* menggunakan mistar *glass*.
  - c. Melakukan pemotretan bidang *checkerboard* dari berbagai sudut pandang menggunakan kedua kamera.
  - d. Memasukkan foto hasil pemotretan bidang *checkerboard* pada Camera Calibrator Apps Matlab.
  - e. Memasukkan nilai ukuran jarak antar *grid corner* yang sudah diukur menggunakan mistar dalam satuan milimeter.
  - f. Aplikasi akan mendeteksi titik *grid corner* pada *checkerboard* di foto secara otomatis, sehingga akan didapat koordinat foto dan koordinat lapangan (*real word*).
  - g. Melakukan proses kalibrasi 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  $p_2$ ).
- Pemodelan 3D objek  
Hasil pemotretan objek Candi Brahu diolah dengan *software* pengolahan foto untuk merkonstruksi menjadi model 3D.



Gambar 3. 7 Diagram alir pemodelan 3D

Pada Tahapan ini dilakukan kegiatan sebagai berikut.

- a. Pemotretan dilakukan pada Candi Brahu yang berada di Trowulan, Mojokerto menggunakan

kamera *DSLM* dan *DSLR*. Pemotretan dilakukan dari berbagai sudut pandang hingga mengitari semua sisi candi.

- b. Menentukan dan mengukur titik kontrol. Pengukuran titik kontrol yang terdapat disekitar candi diukur menggunakan *Total Station* dengan menggunakan metode poligon tertutup. Salah satu titik poligon tersebut adalah titik BM yang terletak di sebelah barat candi dijadikan sebagai referensi karena sudah mempunyai koordinat global.



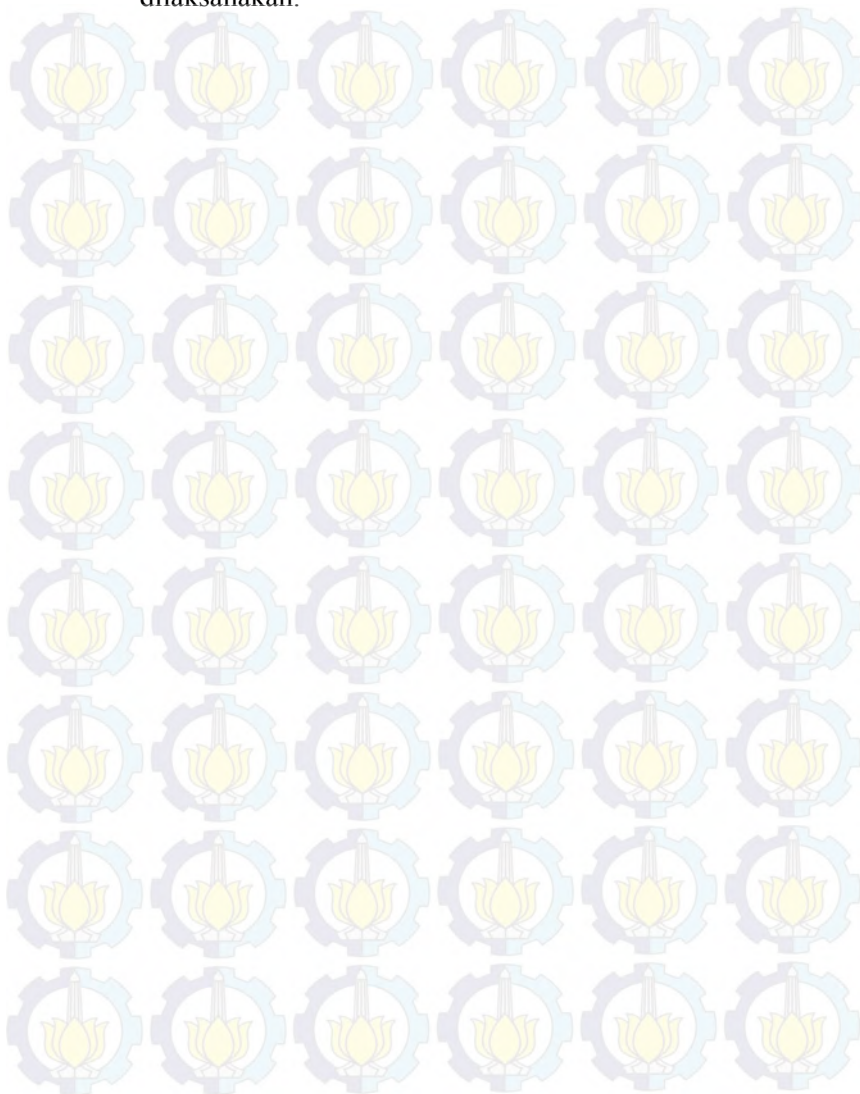
Gambar 3. 8 Titik BM disebelah barat candi

- c. Menentukan dan mengukur titik *GCP* dan titik *ICP*. Pengukuran titik *GCP* dan titik *ICP* menggunakan *Total Station*. Untuk koordinat X dan Y dihitung dengan metode pengikatan kemuka dari titik kontrol. Sedangkan untuk koordinat Z dihitung dengan menggunakan prinsip tinggi bangunan.
- d. Foto candi yang akan digunakan untuk pemodelan dikoreksi dengan parameter orientasi

dalam hasil kalibrasi pada tahap sebelumnya untuk masing masing data kamera.

- e. Dilakukan *space resection* untuk mengetahui orientasi luar kamera yang digunakan pada saat pengambilan foto.
  - f. Dilakukan *space intersection* untuk mendapatkan koordinat objek di lapangan dari foto-foto yang saling bertampalan. Proses ini menghasilkan *point-point* untuk membentuk model *dense point cloud*.
  - g. Menggabungkan *point-point* pada *dense point cloud model* yang telah terbentuk menjadi *surface* dengan proses pembentukan *surface*. Setelah terbentuk *surface* model 3D dilakukan proses *texturing* untuk membuat tekstur model 3D sesuai dengan keadaan di foto.
  - h. Melakukan proses *georeference* dengan melakukan *marking* titik GCP dan menambahkan nilai koordinat GCP.
  - i. Proses *georeference* memenuhi toleransi apabila *RMSE* proses *georeference* kurang dari nilai *GSD*. Nilai *GSD* yang didapat berdasarkan perhitungan persamaan (2.15) adalah 8mm.
  - j. Menganalisa geometrik model 3D objek terhadap geometrik *Total Station* dengan melakukan perhitungan *RMSE* dan uji statistik *t-test*. Pada kegiatan ini geometrik dari *Total Station* dianggap benar sehingga didapat ketelitian model foto.
- d. Tahap Akhir
- Pada tahap akhir penelitian ini adalah dilakukan penarikan kesimpulan berdasarkan analisis dan pembuatan laporan yang sesuai dengan aturan penyusunan yang berlaku. Hasil akhir dari penelitian akan dilaporkan sebagai bentuk

pertanggung jawaban atas penelitian yang telah dilaksanakan.





“Halaman ini sengaja dikosongkan”



## BAB IV HASIL DAN ANALISA

### 4.1 Hasil

#### 6.1.1. Perhitungan Poligon

Kerangka kontrol pada penelitian ini sebanyak 5 titik, yang terdiri dari 1 titik BM yang telah diketahui koordinatnya dan 4 titik yang diukur. Titik BM mempunyai sistem koordinat UTM dijadikan titik ikat pengukuran. Kerangka kontrol ini nantinya digunakan sebagai acuan untuk penentuan *GCP* dan *ICP* pada candi. Alat yang digunakan untuk pengukuran kerangka kontrol adalah *Total Station*. Berikut adalah sketsa pengukuran kerangka kontrol.



Gambar 4. 1 Sketsa pengukuran kerangka kontrol

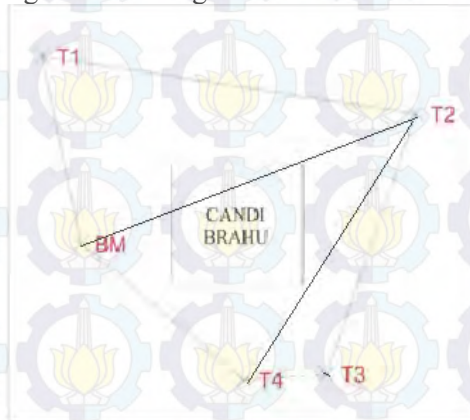
Data yang diambil pada saat pengukuran adalah sudut horizontal, jarak datar, dan jarak vertikal. Berikut adalah tabel hasil pengolahan data pengukuran kerangka kontrol.

Tabel 4. 1 Koordinat titik Kontrol

Titik	Easting (m)	Northing (m)	Height (m)
BM	651646.800	9165981.780	32.910
T1	651638.998	9166016.976	32.904
T2	651713.529	9166006.168	32.602
T3	651695.657	9165957.245	32.935
T4	651679.285	9165956.210	33.010

Hasil perhitungan kerangka kontrol memiliki nilai kesalahan penutup sudut sebesar 8 detik dan kesalahan penutup tinggi sebesar 2 milimeter.

Nilai *strength of figure (SOF)* pengukuran kerangka kontrol ini adalah sebesar 0,857. Nilai *SOF* kurang dari 1 (satu), oleh karena itu persebaran titik dinilai sudah bagus. Berikut adalah konfigurasi jaring pada pengukuran kerangka kontrol.



Gambar 4. 2 Konfigurasi jaring pada pengukuran kerangka kontrol

### 6.1.2. Perhitungan GCP dan ICP

*Ground Control Point (GCP)* dan *Independent Check Point (ICP)* diukur menggunakan alat *Total Station*. Karena titik pada candi tidak bisa dijangkau oleh prisma maka data yang diambil pada waktu pengukuran adalah sudut horizontal dan sudut zenit dari dua titik kontrol sehingga membentuk bangun segitiga. GCP dihitung dengan menggunakan prinsip perhitungan pengikatan ke muka sedangkan untuk ICP menggunakan konsep perhitungan tinggi bangunan.

Terdapat 8 buah GCP yang akan digunakan untuk proses *georeferencing* dan 10 titik ICP yang digunakan sebagai pembanding dalam uji statistik. Letak titik GCP dan ICP pada candi dapat dilihat pada gambar 4.2, 4.3 dan 4.4. Berikut adalah hasil perhitungan GCP dan ICP:

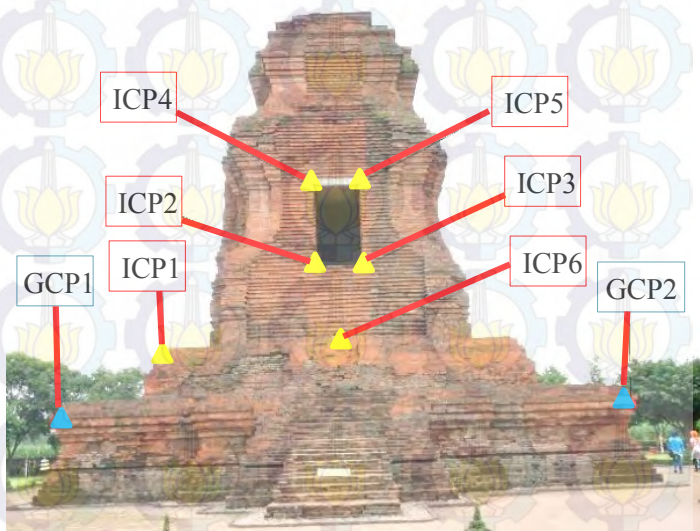
Tabel 4. 2 Koordinat GCP

Titik	Easting (m)	Northing (m)	Height (m)
GCP1	651670,351	9165988,844	35,444
GCP2	651669,218	9165971,319	35,403
GCP3	651670,443	9165988,923	35,327
GCP4	651688,102	9165988,029	35,477
GCP5	651685,202	9165985,415	37,931
GCP6	651684,409	9165973,167	37,882
GCP7	651684,334	9165973,094	37,912
GCP8	651669,263	9165971,251	35,359

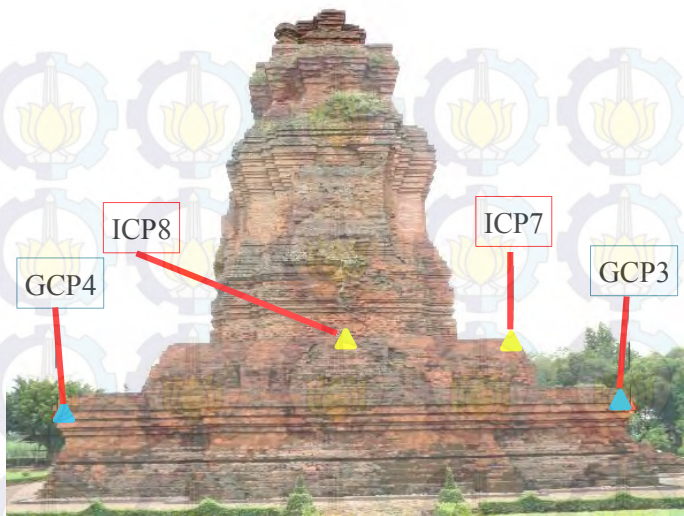
Tabel 4. 3 Koordinat ICP

Titik	Easting (m)	Northing (m)	Height (m)
ICP1	651672,797	9165986,105	37,975
ICP2	651674,514	9165980,869	41,246
ICP3	651674,397	9165978,926	41,261
ICP4	651674,762	9165980,798	44,672

Titik	Easting (m)	Northing (m)	Height (m)
ICP5	651674,700	9165978,948	44,666
ICP6	651671,050	9165980,243	37,824
ICP7	651672,968	9165986,179	38,010
ICP8	651679,128	9165986,611	38,004
ICP9	651688,184	9165987,949	35,407
ICP10	651686,955	9165970,136	35,334



Gambar 4. 3 Letak GCP dan ICP tampak sebelah barat candi



Gambar 4. 4 Letak GCP dan ICP tampak sebelah utara candi



Gambar 4. 5 Letak GCP dan ICP tampak sebelah timur candi



Gambar 4. 6 Letak GCP dan ICP tampak sebelah selatan candi

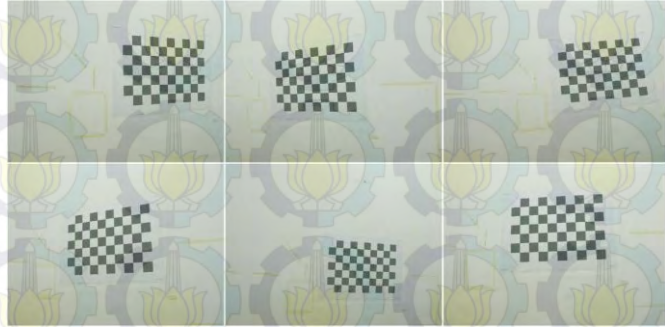
#### 4.1.3. Kalibrasi Kamera

Kalibrasi kamera dilakukan pada kamera DSLR maupun DSLM. Kalibrasi kamera dilakukan dengan memotret sebanyak 15 kali dari berbagai sudut papan kolimator atau checkboard berukuran 594 mm x 841mm dengan banyaknya grid 7 x 10, dimana panjang sisi grid adalah sebesar 70,05 mm.

Kedua kamera diatur pada pengaturan yang sama yakni menggunakan *focal length* 18mm. Mode pemotretan dari kedua kamera adalah pada menu manual sehingga kita bisa mengatur sendiri dan tidak mengalami perubahan. Diameter *aperture* kamera diperkecil sehingga *depth of field*-nya meningkat. Namun karena *aperture* yang kecil menyebabkan cahaya yang masuk semakin sedikit, untuk itu agar *shutter speed* harus diatur lebih lama sehingga cahaya yang masuk mengenai sensor tidak terlalu sedikit.

Pemotretan *checkerboard pattern* dilakukan dengan jarak dari kamera  $\pm 1,5$ m. Semua area

checkerboard harus berada dalam satu *frame* foto. Karena lensa yang digunakan adalah lensa *zoom* maka saat pemotretan tidak diperbolehkan melakukan *zoom in* atau *zoom out* karena nilai *focal length* akan berubah. Foto yang digunakan pada kalibrasi kamera tidak boleh dirubah seperti di *crop*. Kemudian foto diproses dengan bantuan Camera Calibrator Apps Matlab.



Gambar 4. 7 Contoh foto bidang kolimator diambil dari berbagai sudut

*Reprojection error* adalah jarak dalam satuan piksel antara titik yang terdeteksi diawal dengan titik hasil proyeksi menggunakan parameter yang didapat. Ketentuan umum yang diikuti adalah kalibrasi kamera diterima jika nilai *reprojection error* tersebut kurang dari satu piksel (Mathworks, 2015). Oleh karena itu proses kalibrasi ini dilakukan berulang sampai memenuhi *reprojection error* kurang dari satu piksel. Untuk kamera *DSLM* dilakukan kalibrasi berulang sebanyak 3 kali. Sedangkan untuk *DSLR* dilakukan perulangan kalibrasi sebanyak 4 kali sampai memenuhi *reprojection error* kurang dari satu piksel.

Berikut adalah parameter kalibrasi kamera hasil kalibrasi pada kedua kamera:

Tabel 4. 4 Hasil kalibrasi kamera

Parameter	DSLM	DSLR
f (mm)	17,296	18,398
X0 (mm)	11,7334	11,7415
Y0 (mm)	7,6725	7,7204
K1	-0,0020	-0,1053
K2	-0,9544	-0,0046
K3	4,9453	0,2534
P1	-0,0014	0,0005
P2	0,0012	0,0003

#### 4.1.4. Hasil Pemotretan Objek

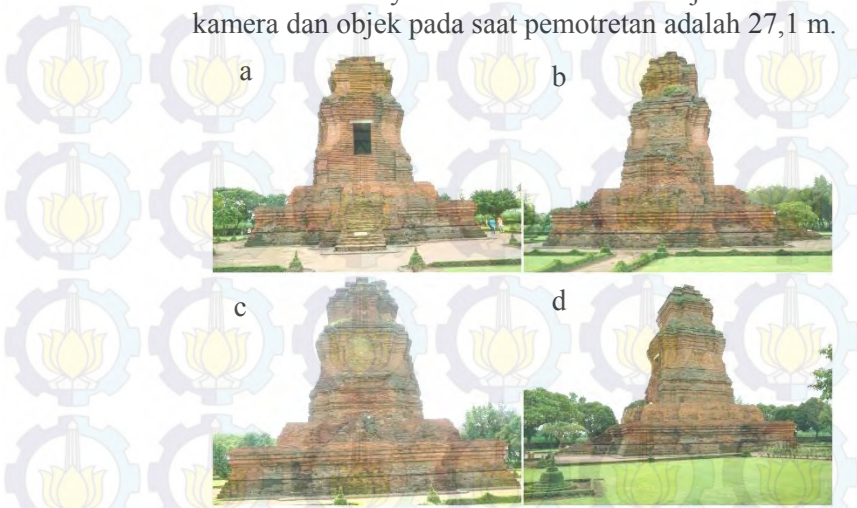
Pemotretan objek Candi Brahu yang berlokasi di Trowulan, Mojokerto dilakukan pada Senin tanggal 29 Februari 2015. Pemotretan dilakukan pada pukul 11.00-13.00 WIB. Kondisi cuaca pada saat itu cerah dengan posisi matahari di atas objek sehingga meminimalisir adanya bayangan pada objek.

Pada saat pemotretan dilakukan pengaturan dari kedua kamera disamakan. *Focal length* yang digunakan sama seperti proses kalibrasi kamera sebelumnya, yaitu 18mm. Bukaannya diafragma juga diperkecil untuk mendapatkan foto yang tajam meskipun besar jarak kamera terhadap objek. *Shutter speed* yang digunakan diperlambat sehingga cahaya yang mengenai sensor lebih lama. Namun karena kecepatan membuka diafragma sedikit lama diusahakan pada saat pemotretan posisi kamera jangan goyang supaya foto yang dihasilkan tidak *blur*.

Pemotretan objek dilakukan dengan memotret semua bagian candi secara utuh dari berbagai sudut dengan mengitari candi tersebut 360 derajat.

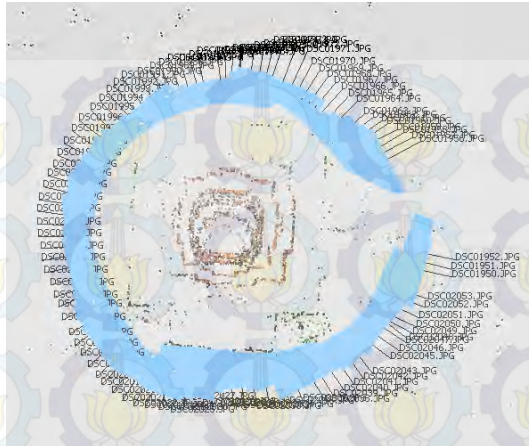


Pemotretan dengan kamera *DSLM* menghasilkan data foto sebanyak 80 foto. Rata-rata jarak antara kamera dan objek pada saat pemotretan adalah 27,1 m.



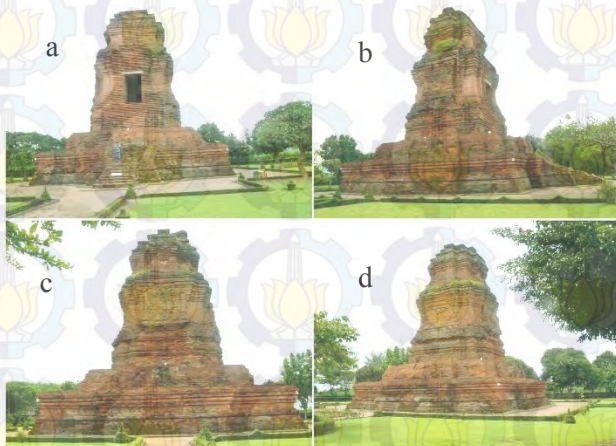
Gambar 4. 8 Beberapa contoh foto Candi Brahu menggunakan *DSLM* tampak sebelah (a) barat, (b) utara, (c) timur, dan (d) selatan

Posisi kamera pada saat pemotretan dapat dilihat pada gambar di bawah ini setelah dilakukan orientasi luar pada foto.



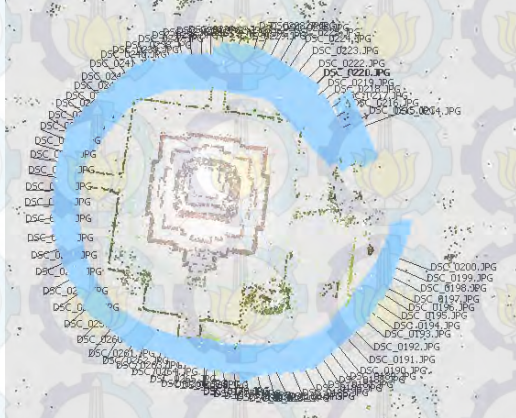
Gambar 4. 9 Posisi kamera *DSLM*

Pemotretan dengan kamera *DSLR* menghasilkan data foto sebanyak 80 foto. Rata-rata jarak antara kamera dan objek pada saat pemotretan adalah 29.156 m.



Gambar 4. 10 Beberapa contoh foto Candi Brahu menggunakan *DSLR* tampak sebelah (a) barat, (b) utara, (c) timur, dan (d) selatan

Posisi kamera pada saat pemotretan dapat dilihat pada gambar di bawah ini setelah dilakukan orientasi luar pada foto.

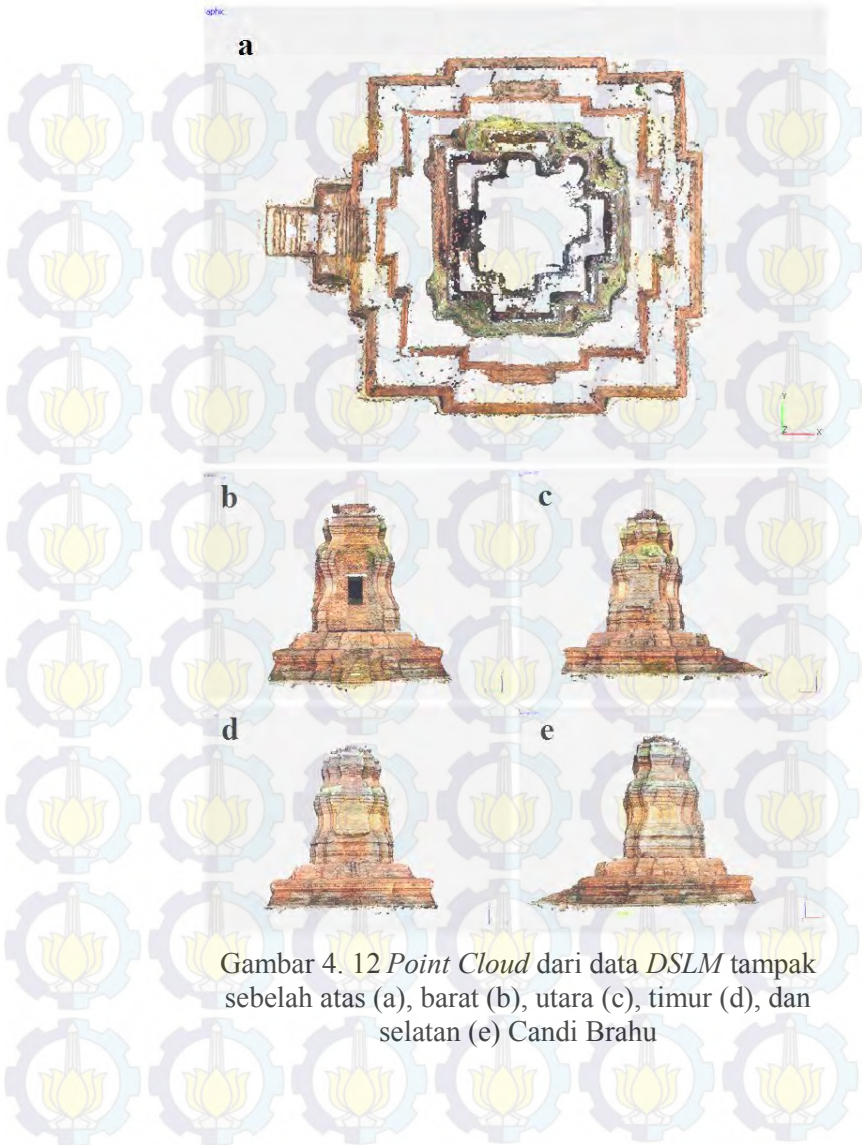


Gambar 4. 11 Posisi kamera *DSLR*

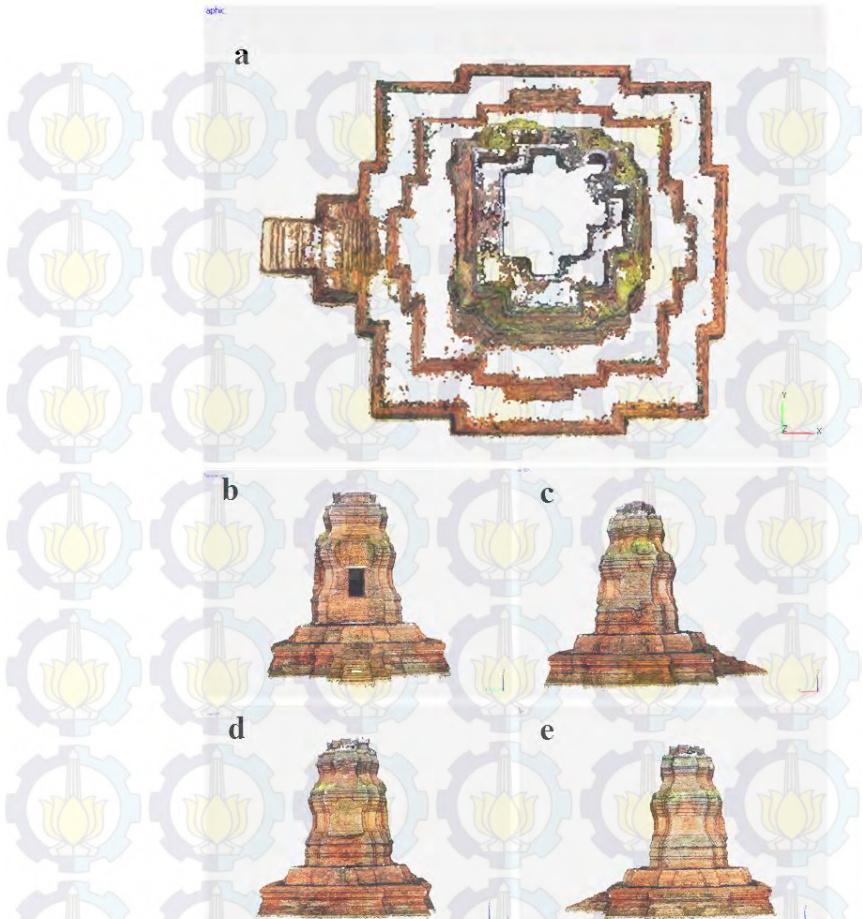
#### 4.1.5. Hasil Model 3D

##### a. *Dense Cloud Model*

Data *dense point clouds* hasil rekonstruksi dari model foto dengan proses *image matching* pada *feature extraktion*. Setelah *dense point cloud* yang terbentuk dibersihkan dari *noise* dari data *DSLM* dihasilkan *point* sebanyak 2.723.055 *point*. Sedangkan dari data *DSLR* dihasilkan *point* sebanyak 2.326.166 *point*. Selisih *point* keduanya adalah 396.889 *point*.



Gambar 4. 12 *Point Cloud* dari data *DSLM* tampak sebelah atas (a), barat (b), utara (c), timur (d), dan selatan (e) Candi Brahu



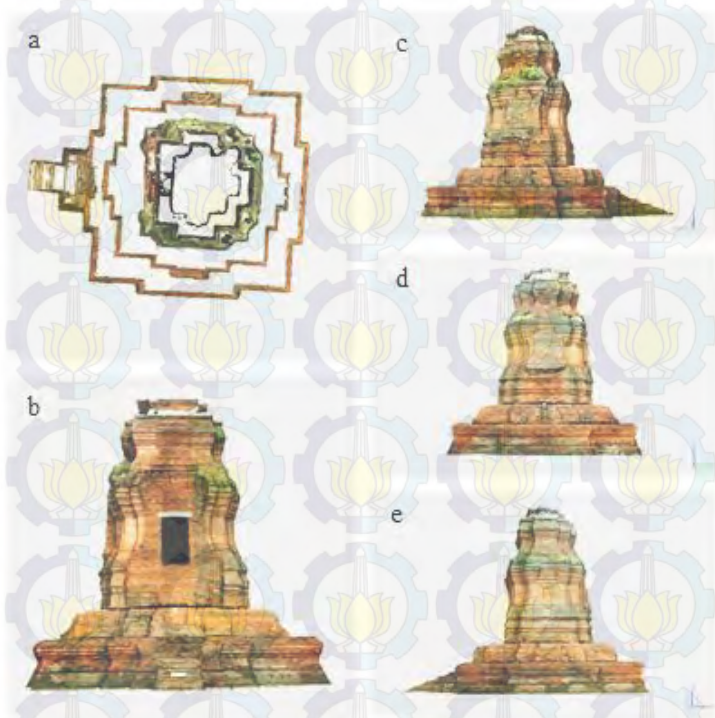
Gambar 4. 13 *Point Cloud* dari data *DSLR* tampak sebelah atas (a), barat (b), utara (c), timur (d), dan selatan (e) Candi Brahu

b. *Surface Model*

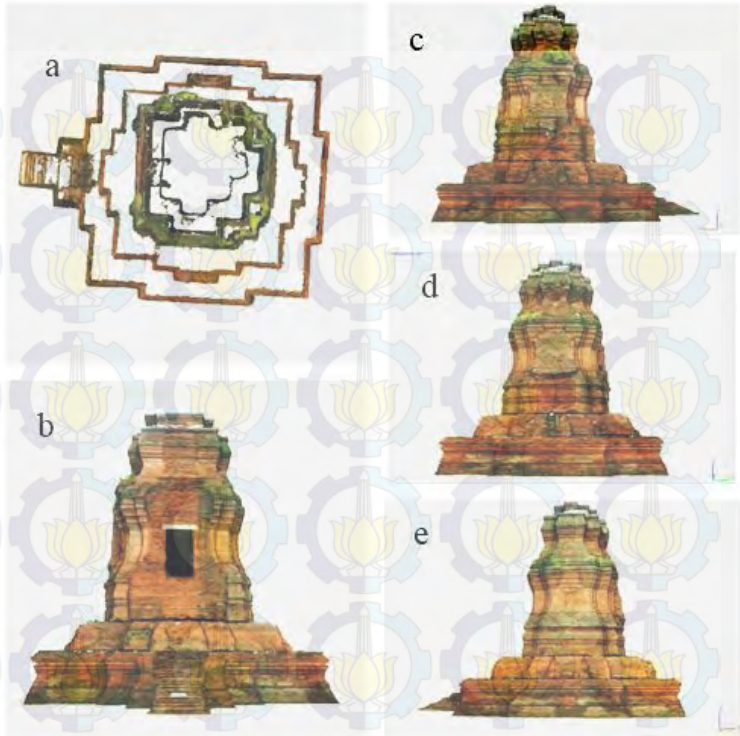
*Dense Cloud* yang telah terbentuk digabungkan menjadi *surface* melalui proses pembuatan *surface*.

Proses pembentukan *surface* menghasilkan *faces* 544.611 dan *vertices* 316.421 untuk data *DSL*M. Sedangkan data *DSL*R menghasilkan *faces* 465.358 dan *vertices* 233.145.

Berikut adalah hasil proses *meshing point* pada objek Candi Brahu.



Gambar 4. 14 *Surface model* dari data *DSL*M tampak sebelah atas (a), barat (b), utara (c), timur (d), dan selatan (e) Candi Brahu

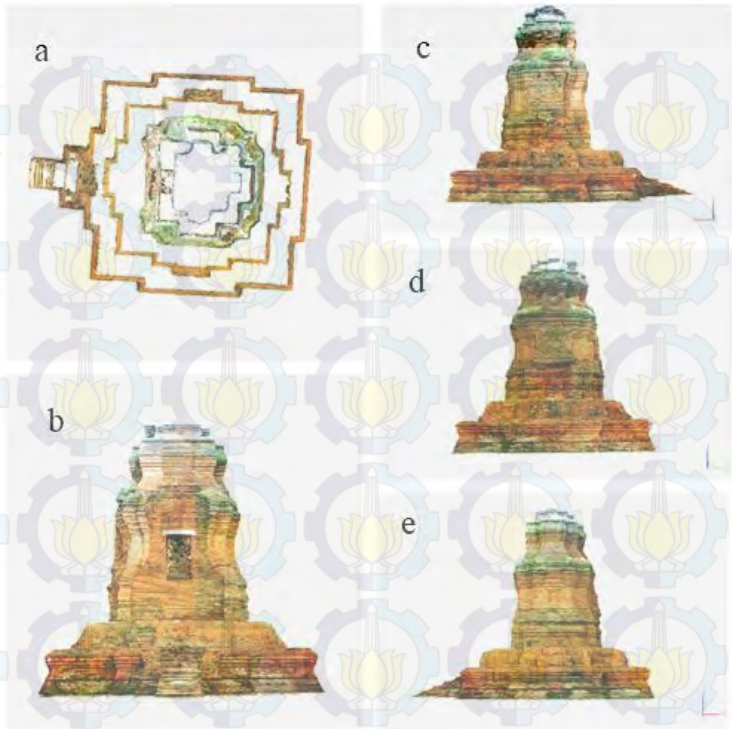


Gambar 4. 15 *Surface model* dari data *DSLR* tampak sebelah atas (a), barat (b), utara (c), timur (d), dan selatan (e) Candi Brahu

### c. *Texture Model*

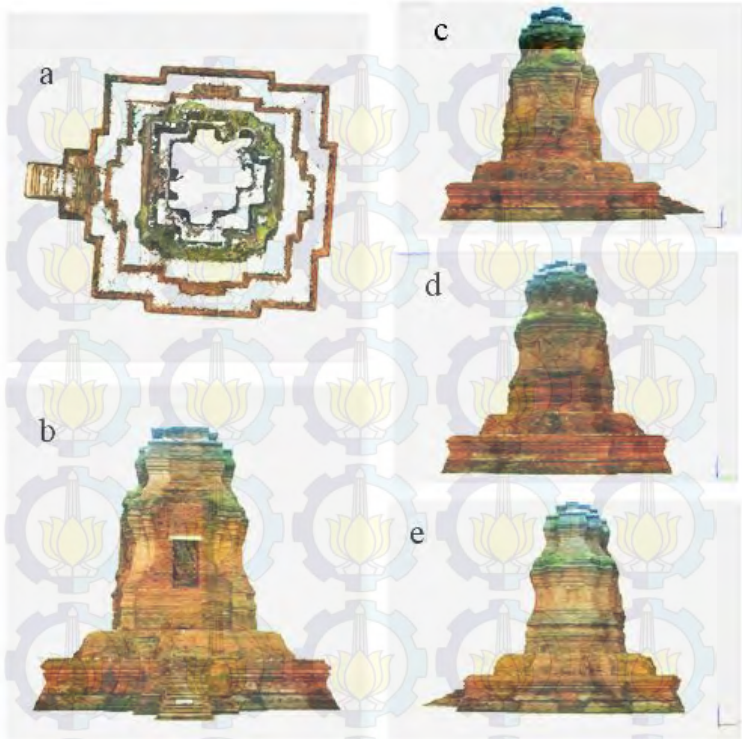
Proses *texturing* dilakukan setelah model objek dibentuk *surface*. Hasil dari proses *texturing* adalah model objek dengan *surface* sesuai apa yang terlihat di foto.

Berikut adalah *texture model* dari kedua model candi.



Gambar 4. 16 *Texture Model* pada dari data *DSLM* tampak sebelah atas (a), barat (b), utara (c), timur (d), dan selatan (e) Candi Brahu





Gambar 4. 17 *Texture Model* pada dari data *DSLR* tampak sebelah atas (a), barat (b), utara (c), timur (d), dan selatan (e) Candi Brahu

#### 4.1.6. Georeference

Proses *georeference* dilakukan untuk mentransormasi koordinat lokal pada model ke dalam satu sistem koordinat global (UTM). Pada proses ini digunakan 8 buah titik GCP yang terdapat pada Tabel 4.2.



Gambar 4. 18 Posisi penempatan titik GCP pada Candi Brahu dilihat dari atas

## 4.2 Analisa

### 4.2.1. Analisa Kerangka Kontrol

Hasil pengukuran kerangka kontrol dianalisa terhadap tiga kriteria, yaitu kesalahan linear, kesalahan penutup sudut dan kesalahan penutup tinggi.

Tabel 4. 5 Kesalahan kerangka kontrol

Kriteria	Nilai
Kesalahan Linear	0.00037
Kesalahan Penutup Sudut	8"
Kesalahan Penutup Tinggi	2 mm

Nilai kesalahan linear pengukuran sebesar 0.00037. Nilai ini lebih kecil dari nilai toleransi kesalahan linear sebesar  $1/2500$  atau 0.0004. Oleh karena itu nilai kesalahan linear masuk nilai ketelitian.

Nilai kesalahan penutup sudut pengukuran didapat sebesar 8". Nilai ini lebih kecil dari nilai

toleransi kesalahan penutup sudut, yaitu sebesar  $11.18''$ . Oleh karena itu kesalahan penutup sudut memasuki nilai ketelitian.

Nilai kesalahan penutup tinggi pengukuran sebesar 2 mm. Nilai ini dibawah nilai toleransi kesalahan penutup tinggi, yaitu sebesar 3.762 mm. Oleh karena itu kesalahan penutup tinggi memasuki nilai ketelitian.

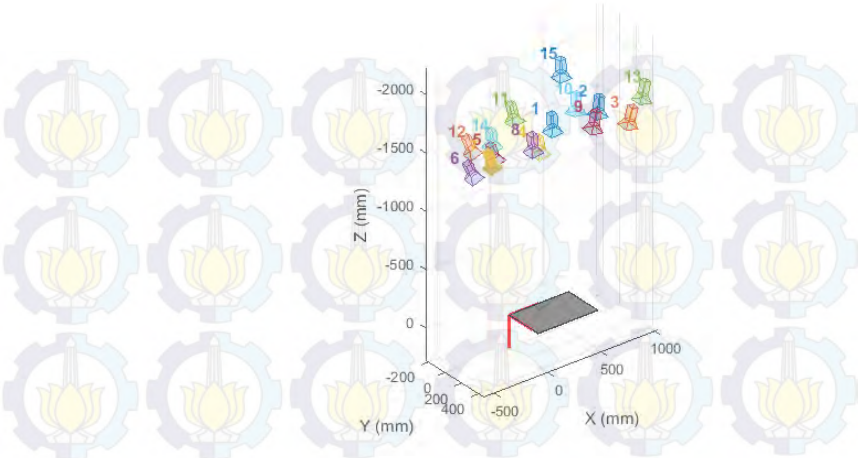
#### 4.2.2. Analisa Kalibrasi Kamera

Kalibrasi kamera kedua kamera masing-masing menggunakan sebanyak 15 foto yang diambil dari berbagai sudut yang berbeda. Pada waktu pemrosesan data menggunakan Camera Calibrator Apps Matlab dari 15 foto, foto dari kamera *DSLR* terdapat 1 foto yang ditolak sedangkan kamera *DSLM* diterima semua. Aplikasi menolak foto tersebut karena kode pada foto tidak dapat mendeteksi titik kolimator sebagai akibat dari *blur* pada foto.

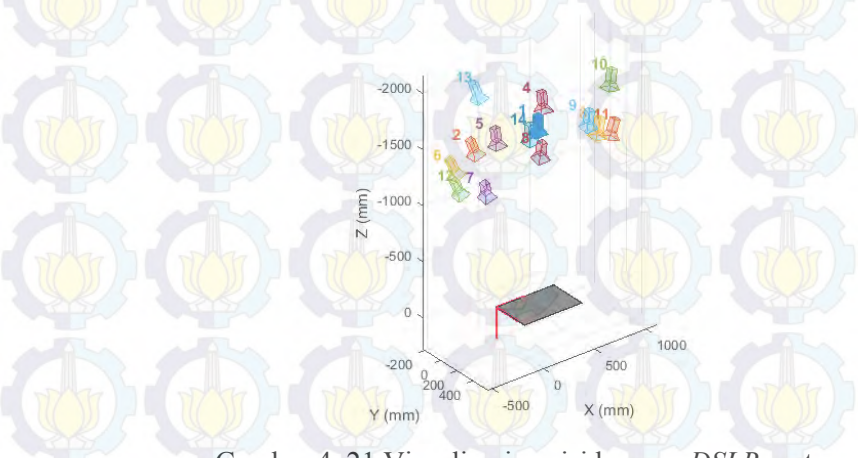


Gambar 4. 19 Foto yang ditolak pada saat kalibrasi

Berikut adalah visualisasi posisi kamera pada saat melakukan pemotretan papan kolimator.



Gambar 4. 20 Visualisasi posisi kamera *DSLM* saat pemotretan *checkerboard pattern*



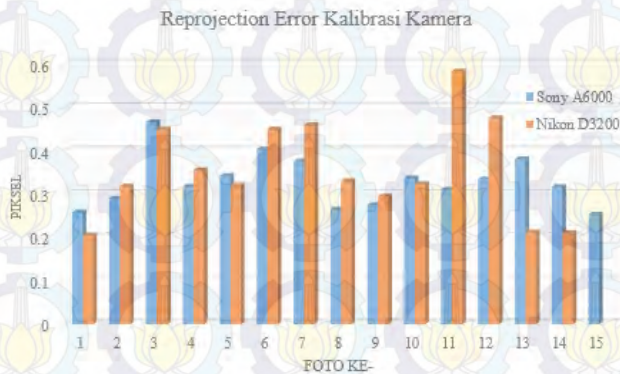
Gambar 4. 21 Visualisasi posisi kamera *DSLR* saat pemotretan *checkerboard pattern*

*Reprojection error* pada masing-masing foto dari kamera *DSLM* dibawah 1 piksel yang bisa dilihat dari grafik Gambar 9. Rata-rata *reprojection error* sebesar

0,329 piksel. *Reprojection error* terbesar pada foto 3 sebesar 0,467 piksel. Sedangkan yang terkecil pada foto 8 sebesar 0,265 piksel.

*Reprojection error* pada masing-masing foto dari kamera *DSLR* dibawah 1 piksel. Rata-rata *reprojection error* sebesar 0,356 piksel. *Reprojection error* terbesar pada foto 11 sebesar 0,584 piksel. Sedangkan yang terkecil pada foto 1 sebesar 0,205 piksel.

Nilai rata-rata *reprojection error* terbesar berada di titik 7 baik untuk pada *DSLM* maupun *DSLR*. Nilai *reprojection error* di titik 7 untuk *DSLM* sebesar 0,598 piksel sedangkan untuk *DSLR* sebesar 0,698 piksel. Titik 7 merupakan titik yang berada jauh dari pusat foto sehingga memiliki kesalahan yang besar.



Gambar 4. 22 Grafik *reprojection error* foto dari kamera *DSLM* dan *DSLR*

Standar deviasi pada proses penentuan parameter kalibrasi kamera adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 6 Standar deviasi kalibrasi kamera

Parameter	Standar Deviasi	
	<i>DSLM</i>	<i>DSLR</i>
<b>f (mm)</b>	0.0361	0.0353
<b>X0 (mm)</b>	0.0153	0.0161
<b>Y0 (mm)</b>	0.0127	0.0130
<b>K1</b>	0.0060	0.0048
<b>K2</b>	0.1077	0.0653
<b>K3</b>	0.5853	0.2743
<b>P1</b>	0.0002	0.0002
<b>P2</b>	0.0003	0.0003

Jenis distorsi radial pada kedua kamera dapat diketahui dengan menghitung fungsi distorsi  $f(r)$  (2.6), dengan mengoperasikan nilai koefisien distorsi radial  $k_1$ ,  $k_2$  dan  $k_3$  yang telah diketahui serta nilai jarak radial  $r$  yang diambil dari sampel titik koordinat foto. Berikut adalah tabel hasil perhitungan kesalahan distorsi.

Tabel 4. 7 Perhitungan nilai fungsi distorsi radial  $f(r)$ 

Koordinat foto (piksel)		<i>DSLM</i>		<i>DSLR</i>	
Baris	Kolom	$r$	$f(r)$	$r$	$f(r)$
3000	2350	0.00149	0.99999	0.00133	0.99986
3550	2000	0.00217	0.99999	0.00213	0.99978
1350	2350	0.00662	0.99995	0.00660	0.99930
2450	1650	0.00247	0.99999	0.00257	0.99973
3550	2350	0.00263	0.99999	0.00251	0.99974

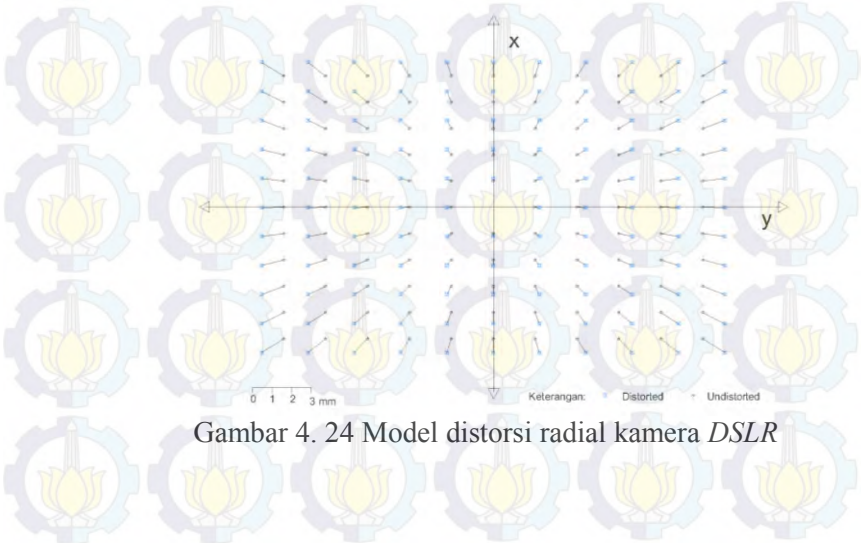
Berdasarkan Tabel 4.7 nilai  $f(r)$  pada kedua kamera kurang dari 1. Jenis distorsi radial lensa pada kedua kamera termasuk *barrel distortion* karena nilai

$f(r) < 1$ . Distorsi radial pada kamera *DSLR* lebih besar daripada *DSLM*, oleh karena itu distorsi radial kamera *DSLM* lebih bagus daripada *DSLR*.

Berikut adalah model distorsi radial kedua kamera tersebut.



Gambar 4. 23 Model distorsi radial kamera *DSLM*



Gambar 4. 24 Model distorsi radial kamera *DSLR*

### 4.2.3. Analisa Model 3D

#### a. *Dense Point Cloud Model*

Data *dense point clouds* hasil rekonstruksi dari model foto dengan proses *build dense cloud*. Setelah *dense point cloud* yang terbentuk dibersihkan dari *noise* dari data *DSL*M dihasilkan *point* sebanyak 2.723.055 *point*. Sedangkan dari data *DSL*R dihasilkan *point* sebanyak 2.326.166 *point*. Jumlah *point* dari model *dense point cloud DSL*M lebih banyak daripada *DSL*R dengan selisih *point* keduanya adalah 396.889 *point*. Perbedaan jumlah *point* yang dihasilkan tersebut dipengaruhi oleh kecocokan *feature* pada foto stereo model *DSL*M lebih banyak daripada *DSL*R. Foto pada *DSL*R lebih banyak mengalami *noise* sebagai dampak dari ukuran sensor yang lebih kecil daripada *DSL*M.

#### Perbandingan jumlah *point* pada *dense point cloud model*



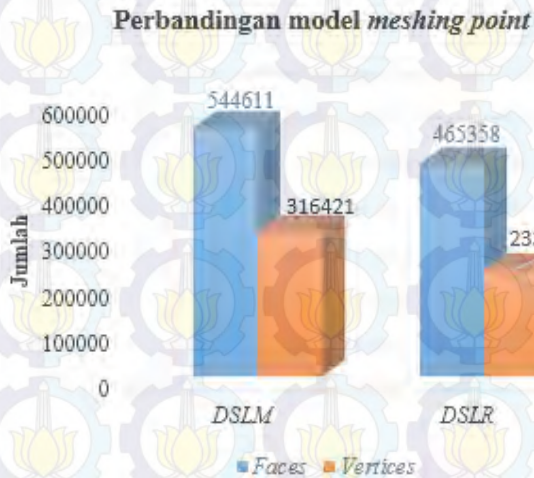
Gambar 4. 25 Grafik perbandingan jumlah *point* pada model *dense point cloud*

#### b. *Meshing Point Model*

Proses *meshing point* menghasilkan *faces* 544.611 dan *vertices* 316.421 untuk data *DSL*M. Sedangkan data



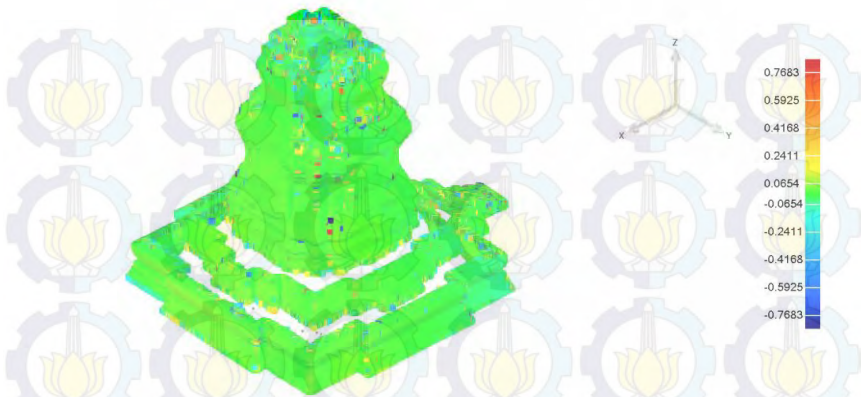
*DSL*R menghasilkan *faces* 465.358 dan *vertices* 233.145. Oleh karenanya permukaan yang terbentuk pada model *DSL*M jauh lebih banyak dari *DSL*R. Hal tersebut dikarenakan jumlah point cloud pada model *DSL*M lebih banyak dari *DSL*R seperti dijelaskan sebelumnya.



Gambar 4. 26 Grafik perbandingan model *Meshing Point*

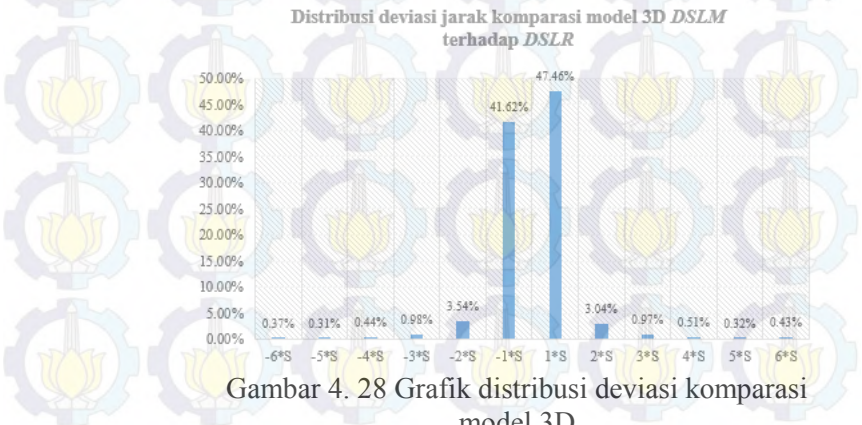
c. Komparasi Model 3D

Model 3D hasil objek Candi Brahu dari data *DSL*M dan data *DSL*R dibandingkan untuk mengetahui perbedaan dari keduanya. Pada perbedaan ini model dari *DSL*R dijadikan referensi sedangkan model dari *DSL*M yang akan di tes. Model dari *DSL*R dijadikan referensi karena nilai *RMSE* pada saat *georeference* lebih baik daripada *DSL*M.



Gambar 4. 27 Deviasi komparasi model *DSLM* terhadap model *DSLR*

Dari Gambar 4.27 terlihat bahwa deviasi jarak dua model candi didominasi warna hijau dengan persentase 81,43%. Jika dilihat pada skala warnanya, warna hijau mempunyai deviasi jarak hasil komparasi antara kedua model berada di antara  $\pm 0,0654$ m.



Nilai standar deviasi hasil komparasi adalah 0,1023m. Berdasarkan Gambar 4.25, sebanyak 89,08% titik berada pada  $\pm 1 \times$  standar deviasi. Oleh karena itu tidak begitu signifikan perbedaan kedua model tersebut. Yang menjadi penyebab adanya deviasi dari kedua model tersebut adalah perbedaan jumlah *point* hasil ekstraksi sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, model *DSL*M lebih banyak daripada model *DSL*R.

#### 4.2.4. Analisa Proses Georeference

Proses *georeference* pada model 3D menggunakan 8 titik GCP pada candi. Model *DSL*M mempunyai *RMS Error* sebesar 4,003mm. Sedangkan model *DSL*R mempunyai *RMS Error* sebesar 3,467mm.

Tabel 4. 8 RMSE proses *georeference*

Data	RMSE (mm)
<i>DSL</i> M	4,003
<i>DSL</i> R	3,647

Dari kedua data tersebut *RMS Error* kurang dari nilai *GSD* sebesar 8mm, sehingga memenuhi toleransi.

#### 4.2.5. Analisa Koordinat ICP

Analisa ketelitian pada kedua model 3D yang terbentuk dilakukan dengan mencari *RMSE* koordinat ICP. Koordinat ICP hasil pengukuran *Total Station* dianggap nilai yang benar. Sehingga didapat ketelitian model sebagai berikut.

Tabel 4. 9 RMSE Koordinat ICP

Data	RMSE (cm)
<i>DSL</i> M	3,803
<i>DSL</i> R	3,650

Dari tabel diatas diketahui bahwa ketelitian untuk model 3D data *DSLR* sebesar 3,650cm dan untuk model 3D data *DSLM* sebesar 3,803cm. Oleh karena itu model 3D data *DSLR* mempunyai ketelitian yang lebih baik dari pada data *DSLM*.

Uji statistik dilakukan terhadap nilai ICP yang dihasilkan oleh model 3D dari kedua kamera, dengan membandingkan nilai ICP yang didapat melalui pengukuran *total station*. Uji statistik yang dilakukan adalah uji *t-student*. Berdasarkan tabel distribusi *t-student*, dengan menggunakan tingkat kepercayaan 95% dan derajat kebebasan sebesar 2, didapatkan nilai  $t = 4,30$ .

Tabel 4. 10 Hasil Uji *t-student* titik ICP pada koordinat Easting

Titik	Interval Min. (m)	Interval Maks. (m)	<i>DSLM</i> (m)	<i>DSLR</i> (m)
ICP1	651672.765	651672.830	651672.857	651672.893
ICP2	651674.481	651674.547	651674.497	651674.488
ICP3	651674.365	651674.430	651674.402	651674.377
ICP4	651674.729	651674.795	651674.742	651674.752
ICP5	651674.667	651674.732	651674.694	651674.681
ICP6	651671.017	651671.082	651671.024	651671.045
ICP7	651672.935	651673.000	651672.965	651672.946
ICP8	651679.095	651679.160	651679.127	651679.112
ICP9	651688.151	651688.217	651688.153	651688.147
ICP10	651686.922	651686.987	651687.011	651686.974

Tabel 4. 11 Hasil Uji *t-student* titik ICP pada koordinat Northing

Titik	Interval Min. (m)	Interval Maks. (m)	DSLM (m)	DSLR (m)
ICP1	9165986.089	9165986.121	9165986.119	9165986.100
ICP2	9165980.853	9165980.885	9165980.868	9165980.860
ICP3	9165978.910	9165978.943	9165978.933	9165978.940
ICP4	9165980.782	9165980.814	9165980.797	9165980.792
ICP5	9165978.932	9165978.964	9165978.953	9165978.946
ICP6	9165980.227	9165980.259	9165980.258	9165980.240
ICP7	9165986.163	9165986.195	9165986.147	9165986.180
ICP8	9165986.595	9165986.627	9165986.610	9165986.596
ICP9	9165987.933	9165987.965	9165987.952	9165987.901
ICP10	9165970.120	9165970.152	9165970.113	9165970.152

Tabel 4. 12 Hasil Uji *t-student* titik ICP pada koordinat Height

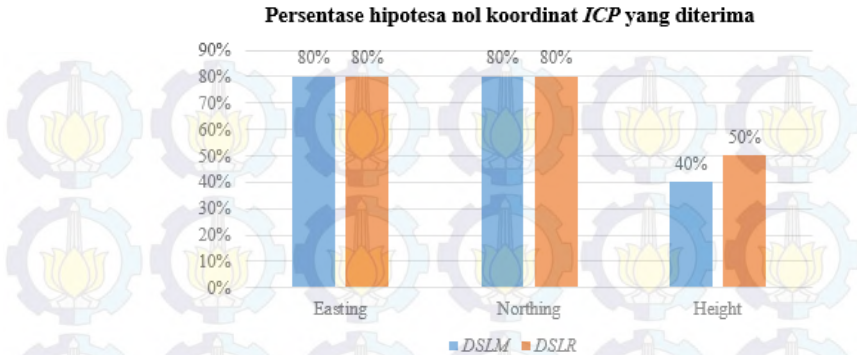
Titik	Interval Min. (m)	Interval Maks. (m)	DSLM (m)	DSLR (m)
ICP1	37.923	38.027	37.955	37.9408
ICP2	41.194	41.298	41.173	41.1801
ICP3	41.208	41.313	41.202	41.2055
ICP4	44.619	44.724	44.586	44.6115
ICP5	44.613	44.718	44.593	44.6135
ICP6	37.771	37.876	37.847	37.8404
ICP7	37.958	38.062	37.938	37.9476
ICP8	37.952	38.056	37.942	37.9505
ICP9	35.355	35.459	35.436	35.4373
ICP10	35.282	35.387	35.333	35.3643

Dengan melihat Tabel 4.10 dapat diketahui bahwa hipotesa nol koordinat model dari *DSLM* pada koordinat *Easting* ( $X$ ) ditolak hanya di titik ICP1 dan ICP10 karena titik-titik tersebut berada di luar interval minimum dan maksimum. Titik yang memenuhi kriteria uji statistik ditunjukkan dengan tulisan berwarna hitam (contoh: 651674,486). Sedangkan untuk titik yang tidak memenuhi kriteria uji statistik ditunjukkan dengan tulisan berwarna merah (contoh: 651672,903). Untuk koordinat *Easting* model dari *DSLR*, hipotesa nol ditolak hanya di ICP1 dan ICP9.

Berdasarkan Tabel 4.11 dapat diketahui bahwa hipotesa nol koordinat model dari *DSLM* pada koordinat *Northing* ( $Y$ ) ditolak di titik ICP1 dan ICP10 sedangkan *DSLR* ditolak di titik ICP1 dan ICP9.

Dengan melihat Tabel 4.12 dapat diketahui bahwa hipotesa nol koordinat model dari *DSLM* pada koordinat *Height* ( $Z$ ) ditolak di titik ICP2, ICP3, ICP4, ICP5, ICP7 dan ICP8, sedangkan *DSLR* pada koordinat *Height* ( $Z$ ) sama di tolak di titik ICP2, ICP3, ICP4, ICP7 dan ICP8.

Berdasarkan uji statistik di atas persentase *ICP* model *DSLM* diterima dengan nilai kepercayaan 95% pada koordinat *Easting* sebesar 80%, *Northing* sebesar 80% dan *Height* sebesar 40%. Sedangkan untuk model *DSLR*, *ICP* diterima dengan nilai kepercayaan 95% pada koordinat *Easting* sebesar 80%, *Northing* sebesar 80% dan *Height* sebesar 50%.



Gambar 4. 29 Grafik perbandingan persentase hipotesa nol koordinat *ICP* yang diterima

Total jumlah titik *ICP* yang diterima untuk *DSLM* sebanyak 20 buah (8 titik untuk koordinat *Easting*, 8 titik koordinat *Northing* dan 4 titik koordinat *Height*) seperti terlihat pada Gambar 4.27, dengan persentase 66,67% *ICP* diterima. Sedangkan untuk *DSLR* total jumlah titik dimana *ICP* diterima adalah sebanyak 21 buah (8 titik untuk koordinat *Easting*, 8 titik koordinat *Northing* dan 5 titik koordinat *Height*) dengan persentase 70,00% *ICP* diterima.

Tabel 4. 13 Hasil keseluruhan analisa *ICP*

Model	ICP Diterima	Persentase
<i>DSLM</i>	24	66,67%
<i>DSLR</i>	25	70,00%

Pada kedua model hipotesa nol diterima dengan persentase dalam rentang 61-80%. Berdasarkan Tabel 2.1 hipotesa nol diterima masuk dalam kategori baik. Oleh karena itu perbedaan koordinat *ICP* kedua model dan Total Station tidak signifikan. Sehingga kedua model 3D Candi Brahu dapat digunakan sebagai acuan

untuk kegiatan perencanaan kedepannya apabila diperlukan.

Berdasarkan Tabel 4.13 dan ketelitian model yang dihasilkan, hasil analisa koordinat *ICP* pada kedua model, dapat disimpulkan bahwa nilai geometrik model dari kamera *DSLR* lebih bagus daripada model dari kamera *DSLM*.

Kamera *DSLM* yang secara fisik tidak mempunyai cermin pantul dan pentaprisma tidak berpengaruh terhadap foto yang dihasilkan. Hasil tersebut dapat dilihat dari hasil analisa koordinat *ICP*, dimana koordinat model data *DSLM* tidak signifikan perbedaannya dengan koordinat hasil pengukuran *Total Station* seperti halnya menggunakan kamera *DSLR*. Jadi ketidakterdapatnya dua komponen tersebut hanya berpengaruh terhadap *live view* pada saat pemotretan, dimana foto yang dilihat pada saat dibidik di *EVF* atau *LCD* akan sama dengan yang dihasilkan.



## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1. Kesimpulan**

Andapun kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian Tugas Akhir ini adalah:

1. Parameter orientasi dalam pada kamera *DSLM* dan *DSLR* didapat melalui kalibrasi kamera. Distorsi radial pada kamera *DSLR* lebih besar daripada kamera *DSLM*.
2. Rekonstruksi model 3D dari foto kamera *DSLR* dan *DSLM* dapat dilakukan. *Feature* yang terbentuk dari data foto kamera *DSLM* lebih bagus daripada *DSLR*. Jumlah *point* pada model *dense point cloud DSLM* 396.889 *point* daripada *DSLR*.. Pada *surface model*, untuk data *DSLM* lebih bagus daripada *DSLR*, yaitu jumlah *faces* dan *vertices DSLM* lebih banyak daripada data *DSLR*.
3. Ketelitian model 3D data *DSLM* adalah 3,803cm, sedangkan model 3D data *DSLR* sebesar 3,650cm. Berdasarkan hasil analisa uji statistik *t-test* pada koordinat ICP model 3D hasil rekonstruksi menunjukkan bahwa persentase jumlah koordinat dimana hipotesa nol diterima sebesar 66,67% model 3D kamera *DSLM* dan 70,00% untuk model 3D kamera *DSLR*, itu artinya kedua model tidak memiliki perbedaan yang signifikan terhadap koordinat hasil pengukuran terestris dengan *Total Station*. Geometrik model 3D dari kamera *DSLM* tidak signifikan perbedaannya dengan pengukuran *Total Station*, sehingga tidak adanya cermin pantul dan pentaprisma pada kamera *DSLM* tidak memberikan pengaruh terhadap ketelitian geometri yang dihasilkan seperti halnya pada kamera *DSLR*.

## 5.2. Saran

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

1. Pada saat pemotretan kalibrasi kamera maupun objek yang akan dimodelkan disarankan untuk memakai tripod serta *remote control* untuk mengurangi guncangan sehingga foto yang dihasilkan tidak *blur*.
2. Pengambilan foto objek yang akan dimodelkan diambil dari ketinggian tertentu sehingga model 3D yang dihasilkan tidak ada yang kosong.
3. Untuk menguji lebih jauh perbandingan dari kamera *DSLM* dan *DSLR* disarankan untuk memakai kamera dengan sensor *full frame*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H. Z., 2002. *Survey Dengan GPS*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Anjasmara, I. M., 2005. *Sistem Tinggi*. Surabaya: Pendidikan dan Pelatihan (DIKLAT) Teknis Pengukuran dan Pemetaan Kota.
- Anonim, 2013. *Kementrian Pendidikan dan Kebudayaan*. <URL:[http://kebudayaan.kemdikbud.go.id/wp/content/uploads/2013/10/3\\_Regnas\\_MODUL\\_II.pdf](http://kebudayaan.kemdikbud.go.id/wp/content/uploads/2013/10/3_Regnas_MODUL_II.pdf)>. Diakses 20 Januari 2016.
- Anonim, 2013. *DSLR-Principal Scheme of Work*. <URL:<http://myphotographylesson.com/dslr-%E2%80%93-principle-scheme-of-work/>>. Diakses 21 Januari 2016.
- Anonim, 2014. *Kamera Mirrorless*. <URL: [belfort.com/kamera-mirrorless/](http://belfort.com/kamera-mirrorless/)>. Diakses 21 Januari 2016.
- Arikunto, S., 2010. *Prosedur Penelitian Suatu Pendekatan Praktik*. Jakarta: PT. Rineka Cipta.
- Aristia, N., 2014. *Pemodelan 3D Kawasan Cagar Budaya Menggunakan Fotogrametri Jarak Dekat Kombinasi Data Terestris dan Foto Udara (Studi Kasus Kawasan Camdi Sambisari-Yogyakarta)*, Yogyakarta: Jurusan Teknik Geodesi dan Geomatika Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada.
- Atkinson, 1980. *Development in Close Range Photogrametri-1*. London: Applied Science Publisher.
- Atkinson, 1996. *Close Range Photogrametry and Machine Vision*. Scotland, UK: Whittles Publishing.
- Aulejtner, M., 2011. *Investigation on Methode for Making Detailed Digital Models of Sulptures and other artefacts*, Krakow, Poland: AGH University of Science and Technology.
- Blank, L., 1982. *Statistical Procedures for Engineering Management and Science*. Tokyo: Mc Graw-Hill Inc..

- Cowley, D. C., 2011. Remote Sensing for Archeological Heritage Management. *EAC Occasional Paper*, Volume 5, p. 307.
- Dipokusumo, 1999. *Pengantar Fotogrametri*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- ESRI, 2006. *A to Z GIS*. Redlands: ESRI Press.
- Fraser, 1997. *Digital camera self-calibration*. s.l., ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 149-159.
- Handayani, H. H., Yuwono & Taufik, M., 2015. Preliminary study of bridge deformation monitoring using GPS and CRP (case study: Suramadu Bridge). *Procedia Environmental Sciences*, Volume 26, pp. 266-276.
- 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.
- Harintaka, 2012. *Fotogrametri Non Tofografi*. Yogyakarta: Jurusan Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Gajah Mada.
- Hugemann, W., 2010. *Correcting Lens Distortions in Digital Photographs*, Leverkusen: EVU.
- Ismail, Y., 2009. *Aplikasi Fotogrametri Rentang Dekat untuk Menentukan Volume Suatu Objek*, Bandung: Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika, ITB.
- Jantra, I. N. H. G., 2014. *Pembuatan Model Tiga Dimensi Candi Gebang Menggunakan Metode Fotogrametri Jarak Dekat*, Yogyakarta: Jurusan Teknik Geodesi, UGM.
- Leitch, K. R., 2010. *Close Range Photogrammetric Measurement of Bridge Deformation*. New Mexico: Lambert Academic Publishers.
- Mathworks, 2015. *Single Camera Calibration*. <URL:<http://www.mathworks.com/help/vision/ug/single-camera-calibrator-app.html?refresh=true>>. Diakses 21 Januari 2016.

- Nikon Corporation, 2012. *Nikon D3200*. <URL:<http://imaging.nikon.com/lineup/dslr/d3200/>>. Diakses 21 Januari 2016.
- Novianty, D., 2015. *Perbedaan Kamera DSLR dan Mirrorless*. <URL:<http://autotekno.sindonews.com/read/1043225/127/ini-perbedaan-kamera-dslr-dan-mirrorless-1441931528>>. Diakses 21 Januari 2016.
- Panasonic Corporation, 2008. *What is Micro Four Thirds?*. <URL:<http://www.panasonic.co.nz/help-and-support/our-guide-to-digital-cameras/what-is-micro-four-thirds/>>. Diakses 21 Januari 2016.
- Putera, B. A. S., 2013. *Kalibrasi Kamera Non-Metrik Digital dengan Metode Self Calibration*, Surabaya: Teknik Geomatika, ITS.
- Putra, A., 2007. *Pengolahan Citra*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Republik Indonesia, 2010. *UU Nomor 11 Tahun 2010 Tentang Cagar Budaya*. Jakarta: Sekretariat Negara.
- Rohmani, K. S., Anom, I. G. N., Mundardjito & Ismijono, 1995. *Upaya Pelestarian Situs Kota Kerajaan Majapahit di Trowulan, Mojokerto, Jawa Timur 1983-1995*, Mojokerto: Departemen Pendidikan dan Kebudayaan, Direktorat Jendral Kebudayaan, Bagian Proyek Pembinaan Peninggalan Sejarah dan Kerpurbakalaan Bekas Kota Kerajaan Majapahit.
- Soemanagara, D. F., 2014. *Candi Brahu*. <URL:<http://kebudayaanindonesia.net/kebudayaan/1887/candi-brahu>>. Diakses 12 Desember 2015.
- Sony Corporation, 2014. *Sony Alpha 6000 E-mount Camera with APS-C Sensor*. <URL:<http://www.sony.com/electronics/interchangeable-lens-cameras/ilce-6000-body-kit>>. Diakses 21 Januari 2016.
- Syndicate, R., 2011. *Fotografi Digital dengan DSLR*. Jakarta: Jal Publishing.

- Topcon Positioning System, 2016. *TOPCON*.  
<URL:<https://www.topconpositioning.com/>>. Diakses  
21 Januari 2016.
- Wahab, A. G., 2009. *Analisis Geometri Data Objek Tiga Dimensi Menggunakan Fotogrametri Rentang Dekat, Terrestrial Laser Scanning, dan Electronic Total Station (ETS)*, Bandung: Teknik Geodesi dan Geomatika, ITB.
- Wahab, A. G., 2009. *Analisis Geometri Data Objek Tiga Dimensi Menggunakan Fotogrametri Rentang Dekat, Terrestrial Laser Scanner, dan Electronic Total Station (ETS)*, Bandung: Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika, ITB.
- Wigrata, H., 1986. *Kalibrasi Besaran - besaran Panjang Fokus dan Distorsi Lensa pada Kamera Non - Metrik*, Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Wolf, P. R., 1983. *Element of Photogrammetry Terjemahan*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Wolf, P. R., 2000. *Elements of Photogrammetry: With Applications in GIS*. s.l.:McGraw-Hill.
- Yastikli, N., emem, O. & Alkis, Z., 2003. *3D Model Generation and Visualization of Cultural Heritage*, Istanbul: Yildiz Technical University, Civil Engineering Faculty, Division of Photogrammetry and Remote Sensing.
- Yilmaz, H. M., Yakar, M. & Yildiz, F., 2008. Digital Photogrammetry in Obtaining of 3D Model Data of Irregular Small Objects. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVII Part B3b, pp. 125-130.
- Zhang, Z., 2000. *A Flexible New Technique for Camera Calibration*. s.l., IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, pp. 1330-1334.

## LAMPIRAN

### Lampiran 1

Tabel Perhitungan Kerangka Kontrol Horizontal

TTIK	SUDUT DALAM	KOREKSI SUDUT	SUDUT TERKOREKSI	AZIMUTH	JARAK	SEBELUM KOREKSI		KOREKSI		SESUDAH KOREKSI		X (m)	Y (m)
						DX	DY	DX	DY	DX	DY		
T0	140.7061111	-0.000444444	140.7056667										
				347.5027778	36.050	-7.801	35.196	-0.001	0.000	-7.802	35.196		
T1	69.25277778	-0.000444444	69.25233333									651638.998	9166016.976
				98.25044444	75.312	74.533	-10.807	-0.002	0.000	74.531	-10.808		
T2	78.18444444	-0.000444444	78.184									651713.529	9166006.168
				200.0664444	52.084	-17.871	-48.922	-0.001	0.000	-17.872	-48.923		
T3	113.6863889	-0.000444444	113.6859444									651695.657	9165957.245
				266.3805	16.404	-16.371	-1.036	0.000	0.000	-16.372	-1.036		
T4	138.1725	-0.000444444	138.1720556									651679.285	9165956.210
				308.2084444	41.341	-32.484	25.570	-0.001	0.000	-32.485	25.570		
T0												651646.800	9165981.780

**Lampiran 2**

Tabel Perhitungan Kerangka Kontrol Vertikal

TITIK	TINGGI ALAT	VD	dZ	koreksi dZ	Z (m)
T0	1.479				32.91
Prisma	1.536	0.051	-0.006	0.0004	
T1	1.510				32.904
Prisma	1.476	-0.337	-0.303	0.0004	
T2	1.452				32.602
Prisma	1.524	0.405	0.333	0.0004	
T3	1.512				32.935
Prisma	1.348	-0.090	0.074	0.0004	
T4	1.423				33.010
Prisma	1.468	-0.055	-0.100	0.0004	
T0	1.479				32.910



**Lampiran 3****Surat Ijin Pengambilan Data**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN  
BALAI PELESTARIAN CAGAR BUDAYA MOJOKERTO  
WILAYAH KERJA PROPINSI JAWA TIMUR**

Jalan Masjid No. 141 - 143, Erwulan, Kabupaten Mojokerto 61361  
Telepon (0321) 495515, Faksimil (0321) 495515  
Email: purbakala\_wktm@yahoo.com

**SURAT IJIN PEMANFAATAN SITUS CAGAR BUDAYA**

Nomor : 0325/CB7/KM/2016

Kepala Balai Pelestarian Cagar Budaya Mojokerto Wilayah Kerja Propinsi Jawa Timur  
menyatakan kepada

Nama Mahasiswa	Moch. Sanj Salam, NRP. 3511100057 Aldino Zakaria, NRP. 3511102086
Asal	Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Jurusan Teknik Geomatika
Memanfaatkan	Candi Brahu dan Kelompok Kerja Perungguan
Kemertian	Ijin penelitian dengan judul "Studi Pemodelan 3D Berdasarkan Proses Filmsasi Manual dan Otomatis (Studi kasus : Candi Brahu)" dan "Pemanfaatan Fotogrametri Rentang Dekat untuk Pemodelan 3D Cagar Budaya Menggunakan Kamera DSLR dan DSLM Terkalibrasi (Studi Kasus : Candi Brahu, Mojokerto)"
Waktu	Bulan Februari s.d Bulan April 2016

Dengan pernyataan sebagai berikut:

1. Dalam kegiatan penelitian tersebut tentunya dapat menyebabkan kerusakan terhadap situs maupun benda cagar budaya terlebih dahulu dikordinasikan dengan Balai Pelestarian Cagar Budaya Mojokerto
2. ikut menjaga kebersihan dan kelestarian lingkungan situs dan cagar budaya
3. Kegiatan dilaksanakan pada pagelangan jam kerja kantor
4. Selama kegiatan didampingi oleh petugas dari Balai Pelestarian Cagar Budaya Mojokerto.
5. Wajib menyerahkan 1 softcopy hasil kegiatan yang dilaksanakan

Apabila di dalam pelaksanaan kegiatan yang Saudara lakukan ternyata terdapat penyimpangan dari pernyataan di atas, maka akan diberi sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku

Demiikian surat ijin ini diberikan agar dipergunakan sebagaimana mestinya

Mojokerto, 3 Februari 2016  
An. Kepala  
Kasubbag Tata Usaha

  
Darlung Wahyu Dharma S.S.  
NIP. 19710602 198903 1 001



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Ciamis, 29 Maret 1994, merupakan anak keempat dari 4 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Pertiwi, SDN 1 Sukasenang, kemudian melanjutkan ke SMPN 1 Cikoneng dan SMAN 2 Tasikmalaya. melanjutkan kuliah S-1 dengan mengikuti program SNMPTN jalur tertulis dan diterima di Teknik Geomatika – FTSP, ITS pada tahun 2012 terdaftar dengan NRP 3512 100 057. Selama kuliah di Teknik

Geomatika penulis aktif mengikuti berbagai kegiatan kampus dan kepanitiaan. Penulis pernah melakukan kerja praktek di Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan (P3GL) untuk membuat peta jalur pelayaran. Di akhir tahun 2015, penulis menjadi salah satu tim peneliti dosen Teknik Geomatika yaitu Ibu Hepsari H, S.T, M.Sc. Di akhir masa studi sarjananya penulis melakukan sebuah penelitian dengan judul **“PEMANFAATAN FOTOGRAMETRI RENTANG DEKAT UNTUK PEMODELAN 3D CAGAR BUDAYA MENGGUNAKAN KAMERA NON-METRIK *DSLM* DAN *DSLR* (STUDI KASUS: CANDI BRAHU, MOJOKERTO)”**.

