

# Pemanfaatan Fotogrametri Rentang Dekat untuk Pemodelan 3D Cagar Budaya Menggunakan Kamera Non-metrik (Studi Kasus: Candi Brahu, Mojokerto)

Moch Sani Salam dan Hepi Hapsari Handayani

Jurusan Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh

Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

*e-mail:* hapsari@geodesy.its.ac.id

**Abstrak**—Candi Brahu merupakan candi agama Buddha dan diperkirakan didirikan abad 15 Masehi yang berada di Trowulan, Mojokerto. Kini terdapat bagian atas yang sudah rusak sehingga hanya menyisakan ketinggian candi  $\pm 20$ m. Sebagai pemegang warisan budaya perlu melakukan pelestarian sebelum warisan yang ada tersebut hilang, salah satunya dengan melakukan pendokumentasian dengan cara pemodelan 3 dimensi (3D) sebagai manajemen asset Cagar Budaya Indonesia. 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). Sebelum dilakukan pemotretan objek dilakukan kalibrasi pada kedua kamera tersebut untuk mendapatkan parameter intrinsik kamera. Akuisisi data di lapangan adalah pengambilan data foto objek dan koordinat titik kontrol, *Ground Control Point* (GCP) serta *Independent Check Point* (ICP) menggunakan *Total Station*. Dari foto-foto objek hasil akuisisi kedua kamera kemudian dilakukan pemodelan 3D dengan bantuan *software* pengolahan foto. Kemudian dilakukan *georeference* terhadap model 3D sehingga model tersebut bereferensi terhadap sistem koordinat UTM. Untuk mengetahui hasil kedua model 3D tersebut cukup akurat atau tidak dilakukan uji statistik *t-test* dengan 5% *level of significant* pada koordinat ICP model dengan koordinat ICP hasil pengukuran *Total Station* yang dianggap benar. Berdasarkan uji *t-test*, hipotesa nol koordinat ICP DSLM diterima dengan prosentasi 66,67% dan koordinat DSLR diterima dengan persentase 70,00% dari total 30 koordinat ICP yang diuji, 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.

**Kata Kunci**—Pemodelan 3D, Fotogrametri Rentang Dekat, Candi Brahu, DSLM, DSLR

## I. PENDAHULUAN

PEMODELAN 3 dimensi (3D) banyak diterapkan pada objek-objek yang dianggap penting baik objek alam ataupun objek buatan manusia seperti warisan budaya dan

arkeologi [5]. Pemodelan 3D bertujuan untuk mengatasi persoalan akan dimensi ketinggian (Z) yang tidak tersaji pada bidang 2D untuk objek yang sangat rumit dan apabila objek tersebut disajikan pada penampakan 2D terdapat informasi yang hilang [7]. Salah satu metode untuk pemodelan 3D objek adalah fotogrametri rentang dekat. Dengan metode ini akan menghasilkan model 3D sesuai kenyataan (radiometrik dan geometrik) sehingga dapat digunakan sebagai dokumentasi [1].

Fotogrametri rentang dekat (*close range photogrammetry*) merupakan cabang dari ilmu fotogrametri, yang membedakannya adalah posisi kamera dengan objek tersebut. Fotogrametri jarak dekat muncul pada saat teknik ini digunakan untuk obyek yang dipotret dengan jarak kurang dari 100 meter dan posisi kamera dekat dengan obyek tersebut [2].

Kegiatan fotogrametri sekarang ini banyak menggunakan kamera non-metrik. Beberapa tahun ini tengah berkembang kamera non-metrik 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 diteruskan 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.

Candi Brahu merupakan candi agama Buddha dan diperkirakan didirikan abad 15 Masehi berada di Trowulan, Mojokerto. Dengan bereferensi pada UU Nomor 11 Tahun 2010 tentang Cagar Budaya [3], Candi Brahu masuk dalam bangunan Cagar Budaya karena telah berusia 50 tahun atau lebih serta memiliki arti khusus bagi sejarah, ilmu pengetahuan, pendidikan, agama, dan/atau kebudayaan. Dulunya di sekitar Candi Brahu masih terdapat beberapa

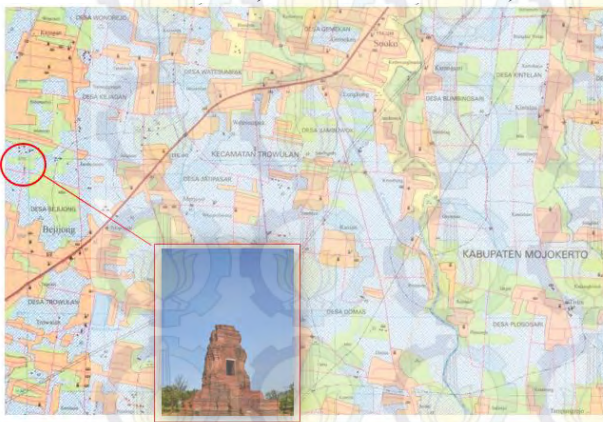
candi lain yang sekarang sudah runtuh diantaranya: Candi Muteran, Candi Gedong, Candi Tengah, dan Candi Gentong [6].

Manfaat dari kegiatan aplikatif ini adalah terjaganya warisan budaya berupa Cagar Budaya Indonesia dengan pendokumentasian model 3D. Sehingga diharapkan dapat membantu rekonstruksi Candi Brahu apabila terjadi sesuatu yang dapat merubah bentuk dan ukuran di masa yang datang sehingga warisan budaya ini dapat dinikmati oleh generasi yang akan datang.

## II. METODOLOGI PENELITIAN

### A. Lokasi Penelitian

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



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

### B. Data dan Peralatan

#### 1) Data

Data yang diperlukan pada penelitian ini adalah foto-foto objek penelitian dengan resolusi 24 megapiksel, foto-foto Checkerboard dan koordinat BM di lokasi penelitian.

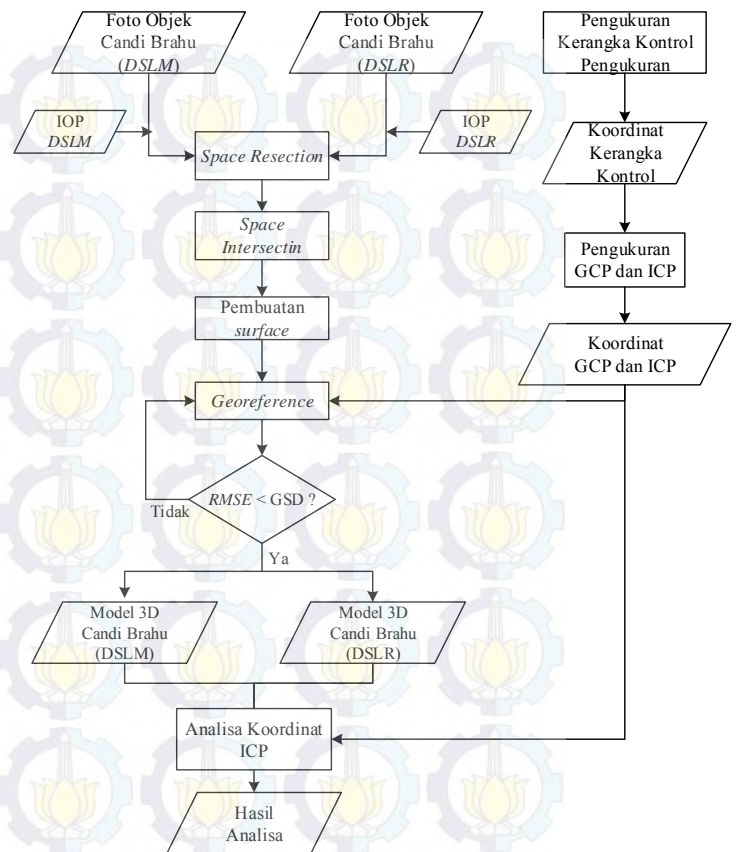
#### 2) Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- Perangkat keras
  - Kamera DSLM Sony A6000
  - Kamera DSLR Nikon D3200
  - *Total Station* untuk pengukuran GCP dan ICP
  - Laptop untuk pengolahan data
  - Mistar untuk pengukuran grid *checkerboard*
- Perangkat lunak
  - *Software* pengolahan *image* untuk pemodelan 3D
  - *Camera Calibrator Apps* MATLAB untuk kalibrasi kamera
  - *Software* komparasi model 3D untuk membandingkan model 3D
  - Microsoft Office untuk pengolahan data dan pembuatan laporan

### C. Diagram Alir Pengolahan Data

Secara garis besar tahapan pengolahan data pemodelan 3D objek yang dilakukan adalah sebagai berikut.



Gambar 2. Diagram alir pengolahan data pemodelan 3D objek  
Penjelasan dari diagram alir di atas adalah sebagai berikut:

#### 1) Kalibrasi Kamera

Kalibrasi kamera dilakukan pada kamera DSLM dan DSLR sebelum digunakan untuk pemotretan objek Candi Brahu. *Checkerboard* digunakan sebagai alat bantu dalam kalibrasi kamera. Proses kalibrasi dilakukan menggunakan *Camera Calibrator Apps* Matlab.

#### 2) Pengukuran Kerangka Kontrol, GCP dan ICP

Pengukuran kerangka kontrol, GCP dan ICP menggunakan alat *Total Station*. Kerangka kontrol digunakan sebagai acuan penentuan titik GCP dan ICP dengan metode poligon. Titik GCP dan ICP dihitung dengan metode pengikatan ke muka dan prinsip perhitungan tinggi bangunan.

#### 3) Pemotretan Candi

Pemotretan candi dilakukan untuk mendapatkan foto objek Candi Brahu. Pengambilan foto dilakukan dengan cara pemotretan terstris menggunakan kamera DSLM dan DSLR.

#### 4) Pemodelan 3D

Pemodelan 3D Candi Brahu dibantu menggunakan *software* pengolahan foto. Terlebih dahulu data foto objek dikoreksi terlebih dahulu menggunakan parameter kalibrasi kamera. Kemudian dilakukan *space resection* untuk mengetahui parameter orientasi luar, *space intercection* untuk mengetahui posisi titik di lapangan dari foto-foto yang saling bertampalan sehingga menghasilkan *dense point cloud model*, dan *meshing point* serta *texturing* sebagai pembuatan *surface model*. Setelah itu dilakukan proses georeference untuk mengubah koordinat lokal menjadi koordinat global (UTM).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasi Kalibrasi Kamera

Kalibrasi kamera dilakukan pada kamera DSLR maupun DSLM. Kalibrasi kamera dilakukan dengan memotret sebanyak 15 kali dari berbagai sudut papan kolimator atau checkerboard. Kedua kamera diatur pada pengaturan yang sama yakni menggunakan focal length 18mm. Kemudian foto diproses dengan bantuan Camera Calibrator Apps Matlab.

Sudah menjadi aturan umum *reprojection error* diterima jika nilai *reprojection error* tersebut kurang dari satu piksel [4]. Oleh karena itu proses kalibrasi ini dilakukan berulang sampai memenuhi *reprojection error* kurang dari satu piksel. Berikut adalah parameter kalibrasi kamera hasil kalibrasi pada kedua kamera:

Tabel 1. Parameter intrinsik kamera 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

B. Hasil Perhitungan Titik Kontrol

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 tabel hasil pengolahan data pengukuran kerangka kontrol.

Tabel 2. Koordinat titik kontrol pengukuran

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	32.601
T3	651695.657	9165957.245	32.934
T4	651679.285	9165956.210	33.008

Hasil perhitungan kerangka kontrol memiliki nilai kesalahan penutup sudut sebesar 8" dan kesalahan penutup tinggi sebesar 2mm.

C. Hasil Perhitungan GCP dan ICP

*Ground Control Point (GCP)* dan *Independent Check Point (ICP)* diukur menggunakan alat *Total Station*. Terdapat 8 buah GCP yang akan digunakan untuk proses *georeferencing*. Nilai *Strength of figure* persebaran GCP adalah 0,239. Lalu 10 titik ICP yang digunakan sebagai pembanding dalam uji statistik. Berikut adalah hasil perhitungan GCP dan ICP:

Tabel 3. Koordinat titik 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. Koordinat titik ICP

Titik	Easting (m)	Northing (m)	Height (m)
ICP1	651672,797	9165986,105	37,695
ICP2	651674,514	9165980,869	41,246
ICP3	651674,397	9165978,926	41,261
ICP4	651674,762	9165980,798	44,672
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

D. Hasil Pemotretan Objek

Pemotretan objek Candi Brahu yang berlokasi di Trowulan, Mojokerto dilakukan pada Senin tanggal 29 Februari 2015. Pemotretan dilakukan pada pukul 12.00-13.00 WIB. Kondisi cuaca pada saat itu cerah dengan posisi matahari di atas objek sehingga menimalisir adanya bayangan pada objek.

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

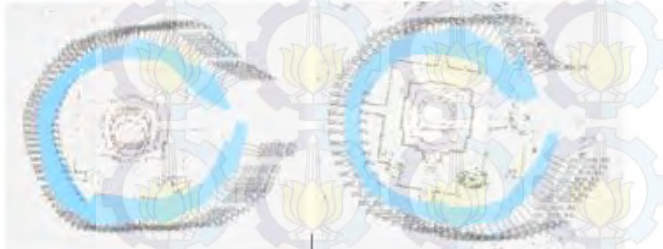


Gambar 3. Beberapa contoh foto Candi Brahu dengan DSLM

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. Beberapa contoh foto Candi Brahu dengan DSLR

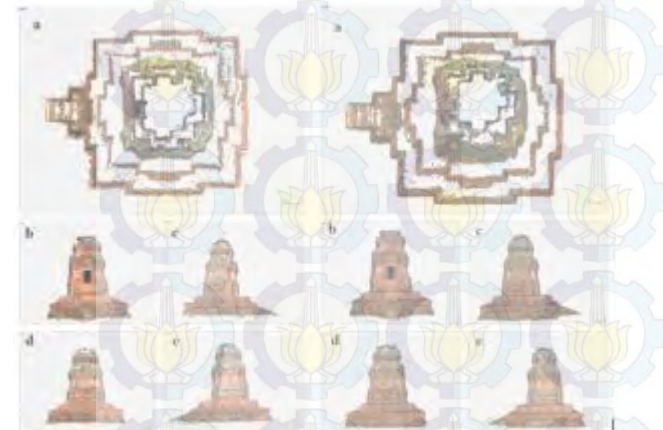


Gambar 5. Posisi kamera DSLM (kiri) dan DSLR (kanan) pada saat pemotretan

**E. Hasil Model 3D**

**1) Dense Point Cloud Model**

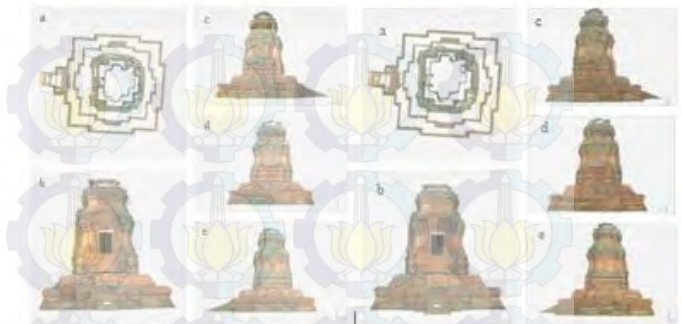
Data *point clouds* di *extract* dari model foto dengan proses *build dense cloud*. Setelah *point cloud* terbentuk kemudian dibersihkan dari *noise*. Berikut adalah *dense point cloud* objek yang terbentuk.



Gambar 6. *Dense Point Cloud* dari data DSLM (kiri) dan DSLR (kanan) tampak sebelah atas (a), barat (b), utara (c), timur (d), dan selatan (e) Candi Brahu

**2) Surface Model**

*Dense Cloud* yang telah terbentuk digabungkan menjadi *surface* melalui proses *meshing point*. Berikut adalah hasil proses *meshing point* pada objek Candi Brahu.

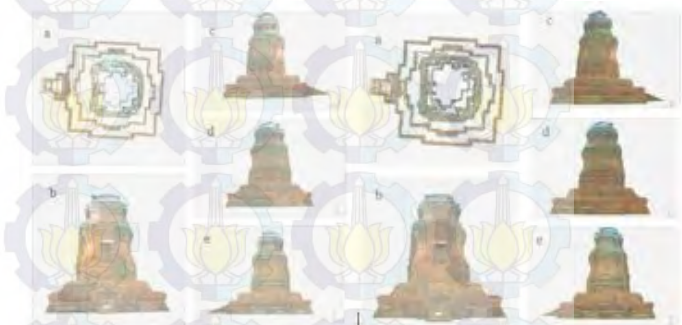


Gambar 7. Hasil *Meshing Point* dari data DSLM (kiri) dan Bikon D3200 (kanan) tampak sebelah atas (a), barat (b), utara (c), timur (d), dan selatan (e) Candi Brahu

**3) Texturing Model**

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

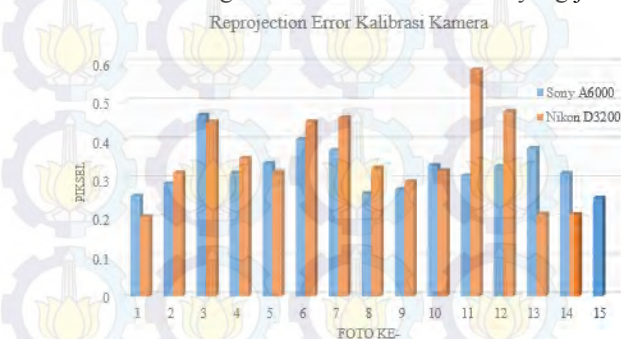
Berikut adalah hasil proses *texturing* dari kedua model 3D Candi Brahu.



Gambar 8. Hasil *Texturing* dari data DSLM (kiri) dan DSLR (kanan) tampak sebelah atas (a), barat (b), utara (c), timur (d), dan selatan (e) Candi Brahu

**F. 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 tidak dapat mendeteksi titik sudut *checkerboard* sebagai akibat dari kualitas foto yang jelek.



Gambar 9. Grafik *reprojection error* foto DSLM

*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.

Jenis distorsi radial pada kedua kamera dapat diketahui dengan menghitung fungsi distorsi  $f(r)$  berdasarkan persamaan polinomial berikut [2]:

$$f(r) = 1 + k_1r + 2r^2 + k_1r^3$$

Setelah dilakukan perhitungan beberapa sampel koordinat foto nilai  $f(r)$  pada kedua kamera kurang dari 1. Jenis distorsi radial lensa pada kedua kamera termasuk *barrel distortion* karena nilai  $f(r) < 1$ .

**G. Analisa Kerangka Kontrol**

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

Tabel 5. Kesalahan kerangka kontrol

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

Berdasarkan Tabel 7, 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 sebesar 8". Nilai ini lebih kecil dari nilai toleransi kesalahan penutup sudut 11.18". Oleh karena itu kesalahan penutup sudut memasuki nilai ketelitian.

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

**H. Analisa Proses Georefernce**

Proses *georeference* pada objek 3D candi menggunakan 8 titik GCP . Berikut adalah RMSE dari proses *georeference*

Tabel 6 RMSE proses *georeference*

Data	RMSE (mm)
DSLM	4.003
DSLR	3.647

RMSE keduanya memenuhi nilai ketelitian karena kurang dari batas toleransi sebebsar 8mm.

**I. Analisa Model 3D**

**1) Dense 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 DSLM

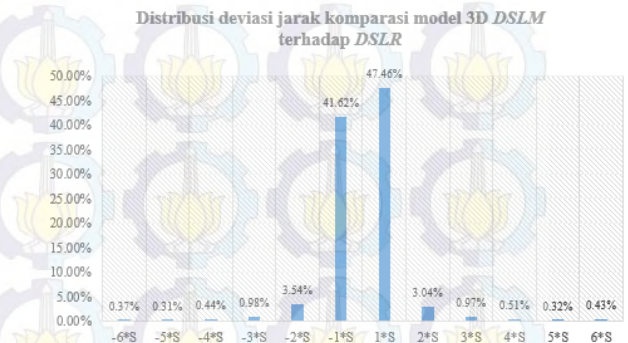
dihasilkan *point* sebanyak 2.723.055 *point*. Sedangkan dari data DSLR dihasilkan *point* sebanyak 2.326.166 *point*. Selisih *point* keduanya adalah 396.889 *point*. Perbedaan jumlah *point* yang dihasilkan tersebut dipengaruhi oleh kecocokan *feature* pada foto stereo model DSLM lebih banyak daripada DSLR. Foto pada DSLR lebih banyak mengalami *noise* sebagai dampak dari ukuran sensor yang lebih kecil daripada DSLM.

**2) Meshing Point Model**

Proses *meshing point* menghasilkan *faces* 544.611 dan *vertices* 316.421 untuk data DSLM. Sedangkan data DSLR menghasilkan *faces* 465.358 dan *vertices* 233.145. Oleh karenanya permukaan yang terbentuk pada model DSLM jauh lebih banyak dari DSLR.

**3) Komparasi Model**

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 DSLM lebih banyak daripada model DSLR.



Gambar 10. Grafik distribusi deviasi komparasi model 3D

**J. Analisa Koordinat ICP**

Uji statistic *t-test*, dilakukan terhadap nilai ICP yang dihasilkan oleh model 3D dari kedua kamera, dengan membandingkan nilai ICP yang didapat melalui pengukuran *total station*. Berdasarkan tabel distribusi dengan menggunakan *level of significant* 5% dan derajat kebebasan sebesar 2, didapatkan nilai  $t = 4,30$ .

Tabel 7. Hasil uji *t-test* titik ICP pada koordinat *Easting*

Titik	Interval Min. (m)	Interval Maks. (m)	DSLM (m)	DSLR (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

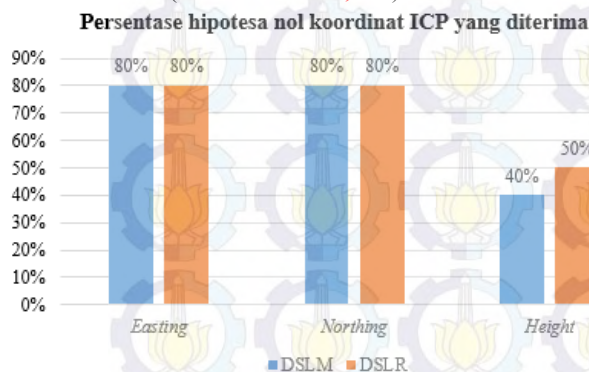
Tabel 8. Hasil Uji *t-test* titik ICP pada koordinat *Northing*

Titik	Interval Min. (m)	Interval Maks. (m)	DSLM (m)	DSLR (m)
ICP1	9165986,089	9165986,122	9165986,119	9165986,100
ICP2	9165980,852	9165980,885	9165980,868	9165980,860
ICP3	9165978,909	9165978,943	9165978,933	9165978,940
ICP4	9165980,781	9165980,815	9165980,797	9165980,792
ICP5	9165978,931	9165978,965	9165978,953	9165978,946
ICP6	9165980,226	9165980,259	9165980,258	9165980,240
ICP7	9165986,163	9165986,196	9165986,140	9165986,180
ICP8	9165986,594	9165986,627	9165986,610	9165986,596
ICP9	9165987,932	9165987,966	9165987,952	9165987,901
ICP10	9165970,119	9165970,153	9165970,113	9165970,152

Tabel 9. Hasil Uji *t-test* 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 7, 8 dan 9, 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).



Gambar 10. Grafik 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 13, dengan persentase 66,67% ICP diterima. Sedangkan untuk DSLR total jumlah titik dimana ICP diterima adalah sebanyak 21 buah (8 titik untuk koordinat *Easting*, 9 titik koordinat *Northing* dan 5 titik koordinat *Height*) dengan persentase 70,00% ICP diterima.

Pada kedua model hipotesa nol diterima dengan persentase berada pada rentang 61-80%. Hipotesa nol berada pada rentang 61-80% termasuk dalam kategori baik [8]. 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.

#### IV. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian tugas akhir ini adalah pembuatan model 3D Candi Brahu dapat dilakukan dengan metode fotogrametri rentang dekat. Model 3D Candi Brahu dari kamera DSLM dan DSLR tidak terdapat perbedaan signifikan dengan deviasi 89,08% berada pada  $\pm 1 \times$  standar deviasi. Tidak adanya reflex mirror dan pentaprisma pada kamera DSLM tidak memberikan pengaruh terhadap ketelitian geometri yang dihasilkan seperti halnya pada kamera DSLR.

Saran yang diberikan oleh penulis adalah pengambilan data foto dilakukan tidak hanya dari tanah tapi dari ketinggian tertentu juga, sehingga model bagian atas candi tidak rusak.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Balai Pelestarian Cagar Budaya (BPCB) Jawa Timur yang telah memberikan ijin untuk melakukan penelitian di Candi Brahu.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Cowley, D. C., 2011. Remote Sensing for Archaeological Heritage Management. *EAC Occasional Paper*, Volume 5, p. 307.
- [2] Hugemann, W., 2010. *Correcting Lens Distortions in Digital Photographs*, Leverkusen: EVU.
- [3] Republik Indonesia, 2010. *UU No 11 Tahun 2010 tentang Cagar Budaya*. Jakarta: Sekretariat Negara.
- [4] Mathworks, 2015. *Single Camera Calibration*. [Online] Available at: <http://www.mathworks.com/help/vision/ug/single-camera-calibrator-app.html?refresh=true> [Diakses 21 Januari 2016].
- [5] Remondino, F., 2011. Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. *Remote Sensing*, Volume 3, pp. 1104-1138.
- [6] Soemanagara, D. F., 2014. *Candi Brahu*. [Online] Available at: <http://kebudayaanindonesia.net/kebudayaan/1887/candi-brahu> [Diakses 12 Desember 2015].
- [7] 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.
- [8] Arikunto, S., 2010. *Prosedur Penelitian Suatu Pendekatan Praktik*. Jakarta: PT. Rineka Cipta.