



TUGAS AKHIR - RG 141536

STUDI PEMODELAN 3D MENGGUNAKAN *TERRESTRIAL LASER SCANNER* BERDASARKAN PROSES *REGISTRASI CLOUD TO CLOUD* DAN *TARGET TO TARGET* (Studi Kasus: Candi Brahu, Mojokerto)

ALDINO ZAKARIA
NRP 3512 100 086

Dosen Pembimbing
HEPI HAPSARI HANDAYANI ST, M.Sc

PROGRAM STUDI TEKNIK GEOMATIKA
Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL ASSIGNMENT - RG 141536

**STUDY OF 3D MODELLING USING *TERRESTRIAL LASER SCANNER* BASED ON *CLOUD TO CLOUD* AND *TARGET TO TARGET REGISTRATION* PROCESS
(Case Study: Brahu Temple, Mojokerto)**

ALDINO ZAKARIA
NRP 3512 100 086

Supervisor
HEPI HAPSARI HANDAYANI ST, M.Sc

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

**STUDI PEMODELAN 3D MENGGUNAKAN
TERRESTRIAL LASER SCANNER BERDASARKAN
PROSES REGISTRASI CLOUD TO CLOUD DAN
TARGET TO TARGET
(Studi Kasus: Candi Brahu, Mojokerto)**

Nama Mahasiswa : Aldino Zakaria
NRP : 3512 100 086
Jurusan : Teknik Geomatika FTSP - ITS
Dosen Pembimbing : Hepi Hapsari Handayani, ST, M.Sc

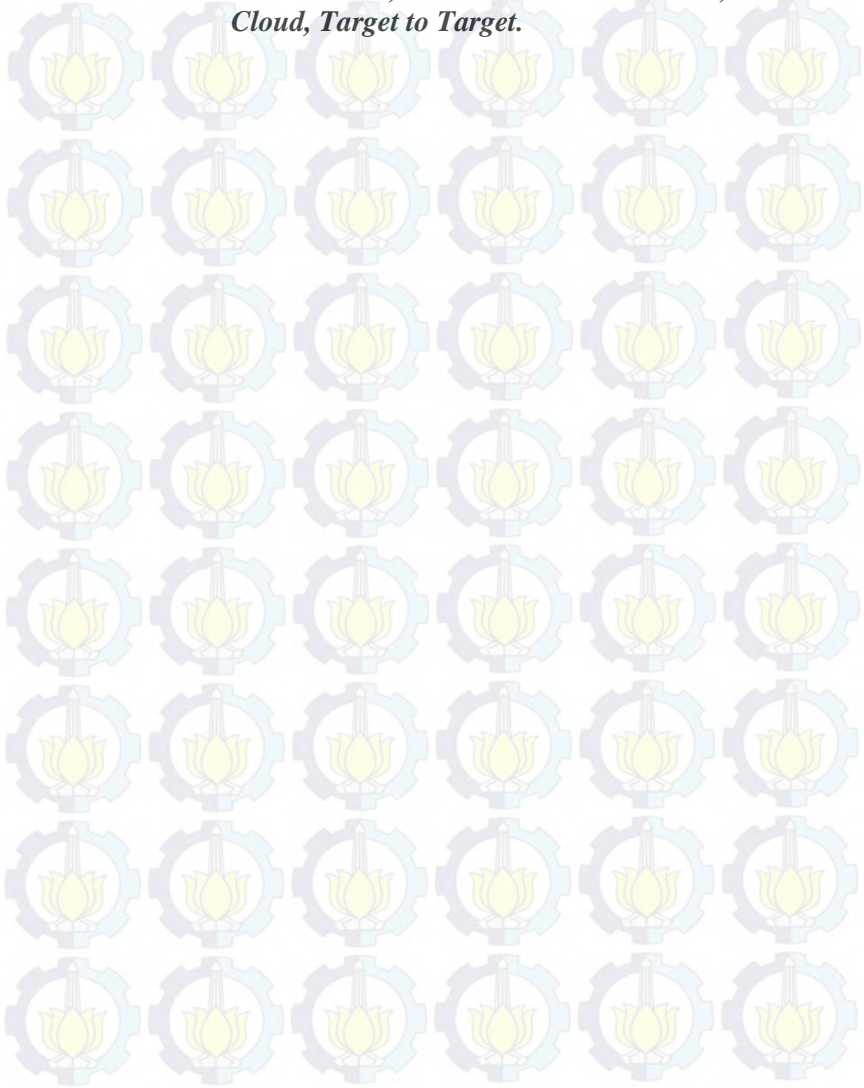
Abstrak

Candi Brahu merupakan salah satu peninggalan sejarah milik Indonesia yang berada pada Situs Trowulan, Mojokerto. Pada awalnya candi ini digunakan sebagai tempat pembakaran, tetapi sekarang Candi Brahu telah dilestarikan dan dijadikan sebagai tempat wisata. Bangunan dengan nilai budaya dan sejarah seperti candi ini membutuhkan perlindungan serta pemeliharaan, di mana salah satu caranya adalah dengan melakukan dokumentasi dalam bentuk 3D.

Pemodelan 3D menggunakan Terrestrial Laser Scanner dalam penelitian ini dilakukan dengan dua metode registrasi, yaitu Cloud to Cloud dan Target to Target. Model yang didapat dari kedua metode ini merupakan point clouds. Nilai deviasi dari kedua metode ini kemudian dibandingkan.

Nilai RMSE registrasi dari deviasi pemindaian pada Candi Brahu adalah Cloud to Cloud sebesar 0.0083m, dan Target to Target adalah sebesar 0.0014m. Dalam uji t student 30 koordinat ICP (10X, 10Y, 10Z) dengan tingkat kepercayaan 90%, titik koordinat Cloud to Cloud yang diterima sebesar 80% dan Target to Target sebesar 86%. Perbandingan tersebut diperlukan untuk mendukung kegiatan pemodelan selanjutnya dalam pemilihan metode registrasi yang paling efektif.

Kata Kunci: Candi Brahu, Terrestrial Laser Scanner, Cloud to Cloud, Target to Target.



**STUDY OF 3D MODELLING USING TERRESTRIAL
LASER SCANNER BASED ON CLOUD TO CLOUD AND
TARGET TO TARGET REGISTRATION PROCESS
(Case Study: Brahu Temple, Mojokerto)**

Name : Aldino Zakaria
NRP : 3512 100 086
Department : Geomatics Engineering FTSP - ITS
Supervisor : Hepi Hapsari Handayani, ST, M.Sc

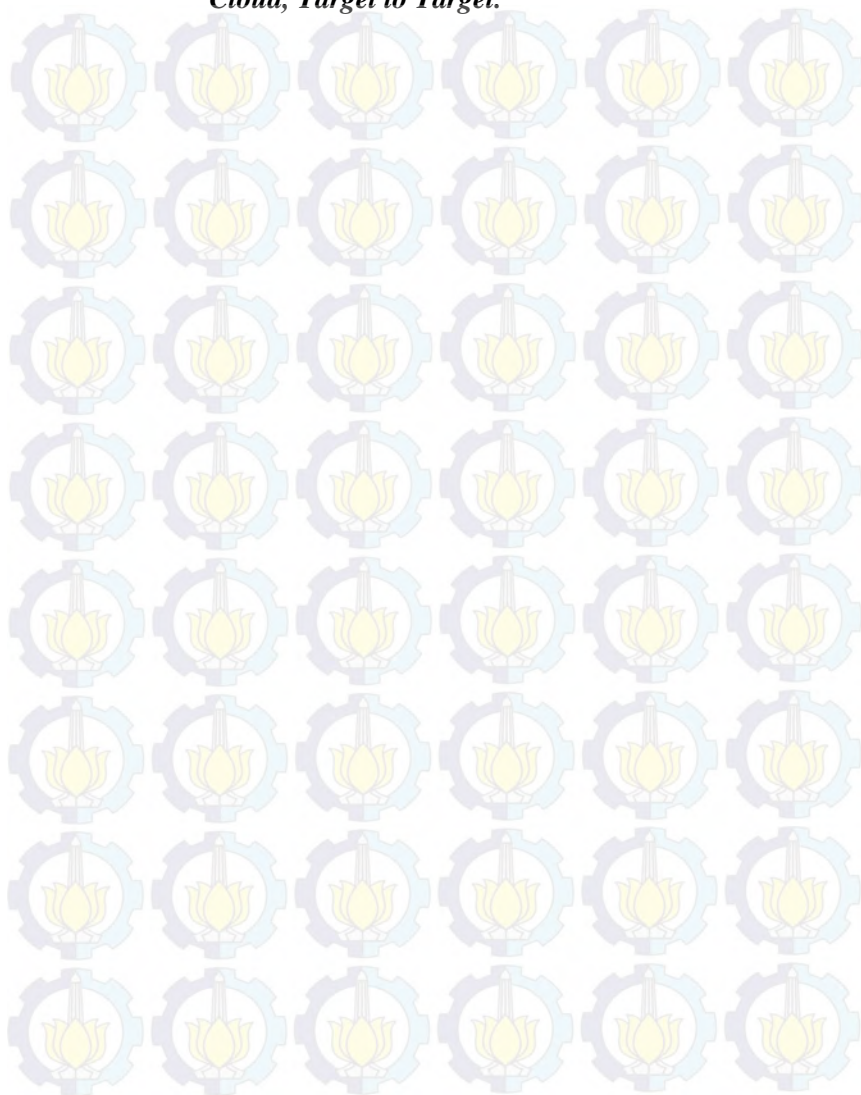
Abstract

Brahu Temple is one of historical relics belonging to Indonesia located in Trowulan Archeological Site, Mojokerto. This temple was originally used as a place of cremation, but now Brahu Temple has been preserved and used as tourist attractions. Building with cultural and historical value such as this temple is in need of protection as well as maintenance, in which one way is to carry out a documentation in 3D.

3D modeling using Terrestrial Laser Scanner in this study was conducted using two registration methods, it is Cloud to Cloud and Target to Target. A model obtained from these two methods is point clouds. Deviation of both models are then compared.

Result of deviation registration compare from Brahu Temple scan are Cloud to Cloud 0.0083m, and Target to Target 0.0014m. On the 30 ICP coordinates (10X,10Y,10Z) t student test using 90% confidence level, coordinate points of Cloud to Cloud get 80% accepted, and Target to Target 86% accepted. The result would be refrence to selection the most efective registration method for another modelling project.

Keywords: *Brahu Temple, Terrestrial Laser Scanner, Cloud to Cloud, Target to Target.*



**STUDI PEMODELAN 3D MENGGUNAKAN
TERRESTRIAL LASER SCANNER BERDASARKAN
PROSES REGISTRASI CLOUD TO CLOUD DAN
TARGET TO TARGET
(Studi Kasus: Candi Brahu, Mojokerto)**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Jurusan S-1 Teknik Geomatika
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

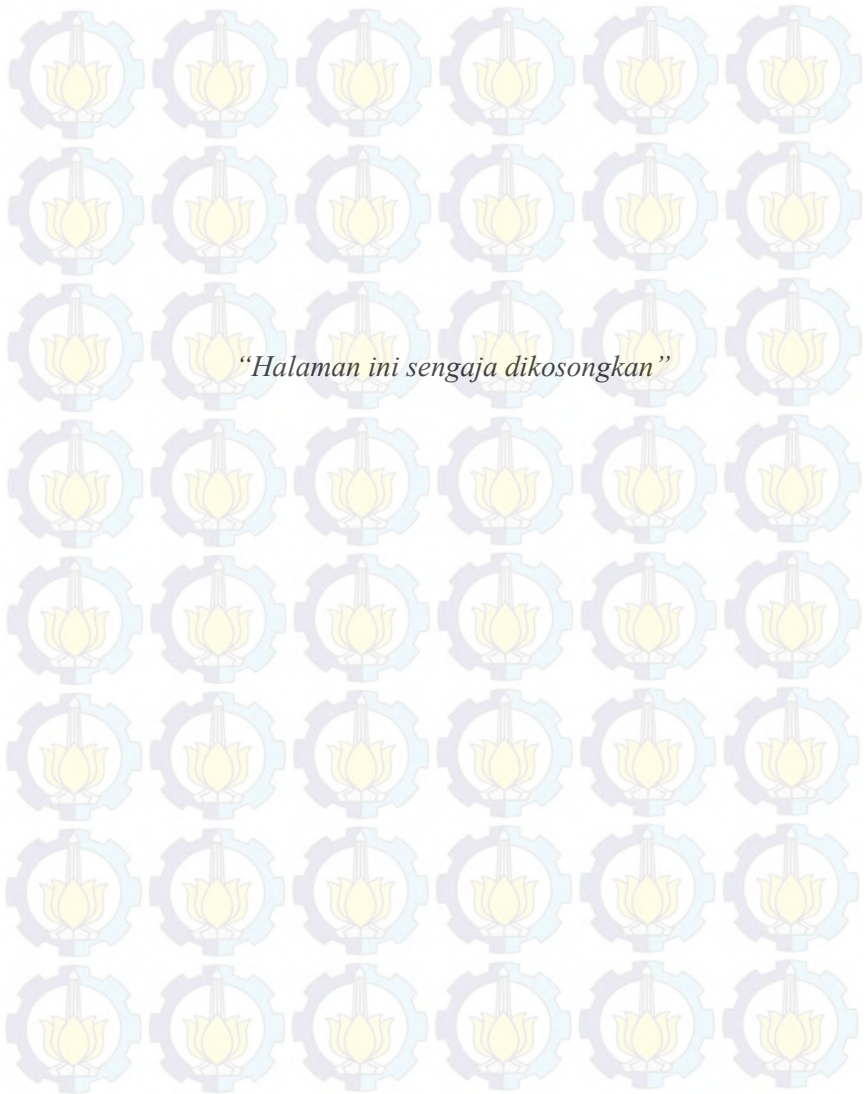
Oleh :
ALDINO ZAKARIA
NRP. 3512 100 086

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

Hepi Hapsari Handayani, ST, M.Sc
NIP. 1978 1212 2005 01 2001



SURABAYA, JUNI 2016



KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur ke hadirat Allah SWT, karena atas segala karunia dan kasih-NYA kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dalam Tugas Akhirnya yang berjudul “STUDI PEMODELAN 3D MENGGUNAKAN TERRESTRIAL LASER SCANNER BERDASARKAN PROSES REGISTRASI *TARGET TO TARGET* DAN *CLOUD TO CLOUD* (Studi Kasus: Candi Brahu, Mojokerto)” sesuai dengan waktu yang ditentukan.

Pada kesempatan ini penulis hendak menyampaikan ucapan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini. Ucapan terima kasih ini penulis tunjukkan kepada:

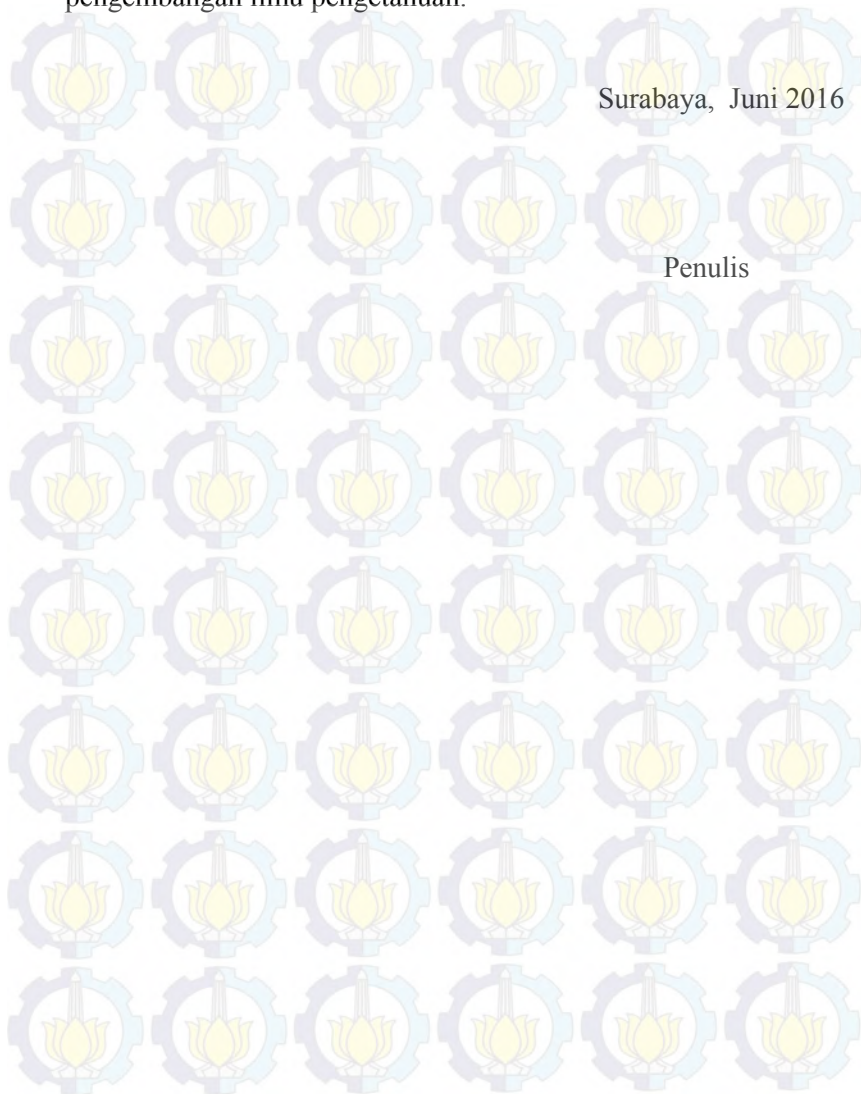
1. Orang tua penulis yang telah memberikan dukungan dan do'a restu.
2. Bapak Mokhammad Nur Cahyadi, ST, M.Sc, Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Geomatika FTSP - ITS.
3. Ibu Hesti Hapsari Handayani, ST, M.Sc selaku dosen pembimbing yang selalu sabar dalam membimbing penulis.
4. Bapak - Ibu Dosen dan Karyawan Teknik Geomatika FTSP-ITS.
5. PT. Sistem Solusi Geospasial yang telah membantu dalam meminjam alat.
6. Balai Pelestarian Cagar Budaya Mojokerto yang telah memberi izin untuk melakukan penelitian di area Candi Brahu.
7. Seluruh rekan Jurusan Teknik Geomatika terutama Sahabat Gelembung, HHH Team dan Angkatan 2012 yang telah banyak membantu menyelesaikan penelitian Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari segala keterbatasan yang dimiliki, tentunya Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun untuk pengembangan selanjutnya. Harapan penulis atas Tugas Akhir ini adalah semoga dapat memberikan manfaat bagi semua pihak dan

dapat diterima sebagai sumbangan pemikiran dalam pengembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Juni 2016

Penulis



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
Abstrak	vi
KATA PENGANTAR	xii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR TABEL	xx
DAFTAR LAMPIRAN	xxii
BAB I	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat.....	4
BAB II	5
2.1 Pengukuran Teristis.....	5
2.1.1 Pengukuran Detil.....	5
2.1.2 Metode Tachimetry.....	5
2.1.3 Toleransi Kesalahan Sudut.....	7
2.1.4 Toleransi Kesalahan Linier.....	8
2.2 <i>Terrestrial Laser Scanning</i>	8
2.2.1 Prinsip Pengukuran TLS.....	9
2.2.2 Klasifikasi <i>Terrestrial Laser Scanner</i>	12
2.2.3 Teknik Registrasi Data.....	14
2.2.4 <i>Georeferencing</i>	16
2.2.5 Rekonstruksi Permukaan dan Pemodelan.....	18
2.2.6 <i>Noise Filtering</i>	19
2.2.7 <i>Self-Calibration of Terrestrial Laser Scanner</i>	21
2.3 Kualitas Pemodelan 3 Dimensi.....	22

2.3.1	<i>Root Mean Square Error</i> dan Standar Deviasi.....	22
2.4	Uji Statistik <i>t-student</i>	23
2.5	Desain Kekuatan Jaring.....	24
2.6	Candi Brahu.....	27
2.7.1	Nama.....	27
2.7.2	Uraian Bangunan.....	28
2.7.3	Fungsi Candi Brahu.....	28
BAB III	29
3.1	Lokasi Penelitian.....	29
3.2	Data dan Peralatan.....	29
3.2.1	Data.....	29
3.2.2	Peralatan.....	30
3.3	Metodologi Penelitian.....	34
3.3.1	Tahap Persiapan.....	35
3.3.2	Tahap Pengolahan Data.....	35
3.3.3	Tahap Analisa.....	38
3.3.4	Tahap Penyajian Data.....	38
BAB IV	39
4.1	Hasil.....	39
4.1.1	Perhitungan Poligon.....	39
4.1.2	Perhitungan GCP dan ICP.....	41
4.1.3	Perencanaan TLS.....	44
4.1.4	Registrasi.....	45
4.1.5	<i>Filtering</i>	46
4.1.6	Hasil Model.....	48
4.1.7	<i>Georeference</i>	50
4.1.8	Koordinat ICP data <i>CTC</i> dan <i>TTT</i>	51
4.2	Analisa.....	52
4.2.1	Analisa Kerangka Kontrol.....	52

4.2.2	Analisa Registrasi.....	53
4.2.3	Analisa Filtering.....	55
4.2.4	Analisa Densitas <i>Point Clouds</i>	56
4.2.5	Analisa Proses <i>Georeference</i>	57
4.2.6	Perbandingan Model 3D.....	58
4.2.7	Analisa Ukuran Geometris Model.....	60
4.2.8	Analisa Koordinat ICP.....	60
BAB V	64
5.1	Kesimpulan.....	65
5.2	Saran.....	65
DAFTAR PUSTAKA	67
PROFIL PENULIS	75



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Ilustrasi Metode Trigonometri.....	6
Gambar 2. 2 Electronic Total Station Rumus Dasar Tachymetry ..	7
Gambar 2. 3 Mekanisme pengukuran TLS.....	10
Gambar 2.4 Prinsip pengukuran TLS.....	11
Gambar 2.5 Perbedaan 3 jenis TLS.....	14
Gambar 2.6 Hubungan sistem koordinat pada TLS Sumber: (Reshetyuk, 2009)	17
Gambar 2.7 Pendekatan Noise Filtering.....	21
Gambar 2. 8 Candi Brahu.....	27
Gambar 3. 1 Lokasi Penelitian: Candi Brahu.....	29
Gambar 3. 2 <i>Terrestrial Laser Scanner</i> GeoMax Zoom 300 (Sumber: Geomax Corp.)	31
Gambar 3. 3 TOPCON GTS-235	32
<i>Gambar 3. 4</i> Diagram Alir Tahapan Penelitian.....	34
Gambar 3. 5 Diagram Alir Tahap Pengolahan Data.....	36
Gambar 4. 1 Sketsa pengukuran poligon.....	39
Gambar 4. 2 Konfigurasi jaring pada pengukuran kerangka kontrol	40
Gambar 4. 3 Letak GCP dan ICP pada sisi barat Candi	42
Gambar 4. 4 Letak GCP dan ICP pada sisi utara Candi	43
Gambar 4. 5 Letak GCP dan ICP pada sisi timur Candi	43
Gambar 4. 6 Letak GCP dan ICP pada sisi selatan Candi.....	44
Gambar 4. 7 Perencanaan Posisi Laser Scanner.....	45
Gambar 4. 8 Pemilihan titik sekutu pada saat proses registrasi <i>Cloud to Cloud</i>	45
Gambar 4. 9 Pemilihan target pada proses registrasi <i>Target to Target</i>	46
Gambar 4. 10 Point cloud candi brahu sebelum proses Filtering	47
Gambar 4. 11 Point cloud candi brahu setelah proses Filtering ..	47

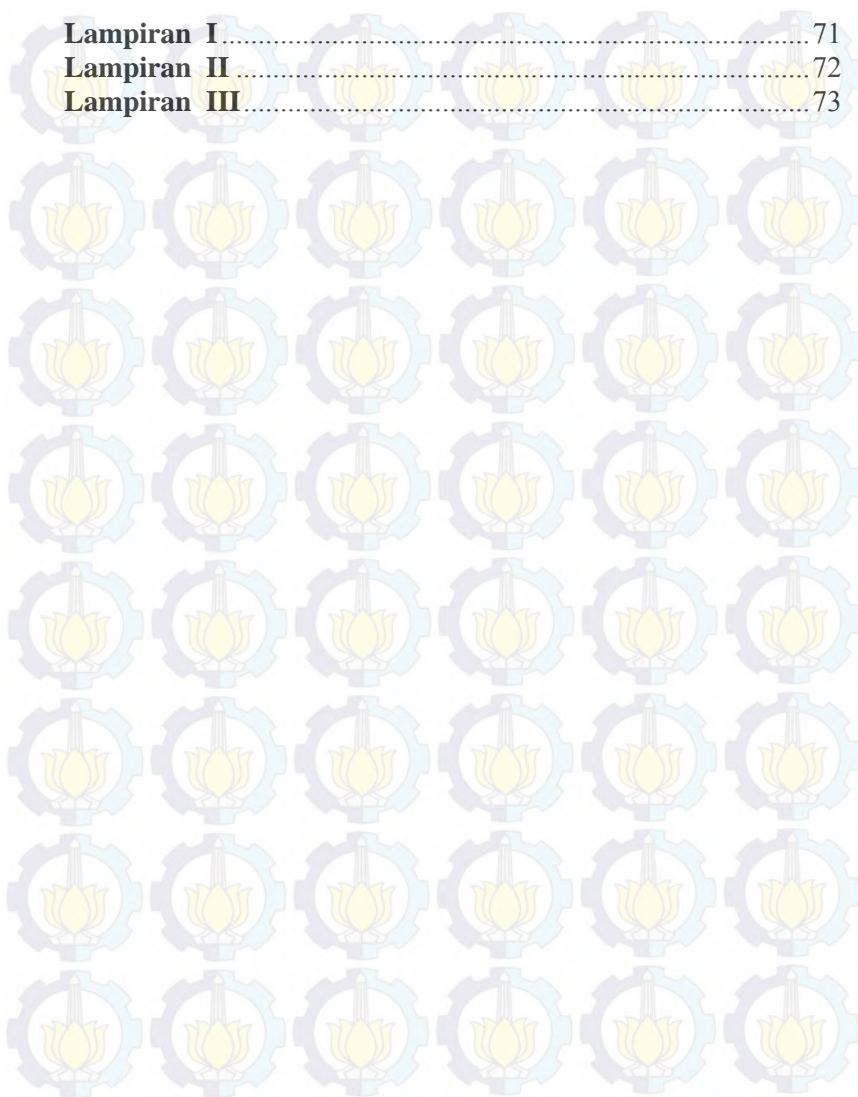
Gambar 4. 12 Data TLS Candi Brahu dengan metode registrasi <i>Cloud to Cloud</i> tampak sebelah barat (A), sebelah utara (B), sebelah timur (C), sebelah selatan (D), dan tampak atas (E).....	48
Gambar 4. 13 Data TLS Candi Brahu dengan metode registrasi <i>Target to Target</i> tampak sebelah barat (A), sebelah utara (B), sebelah timur (C), sebelah selatan (D), dan tampak atas (E).....	49
Gambar 4. 14 Proses Georefrencing.....	50
Gambar 4. 15 Grafik Jumlah Point Clouds	55
Gambar 4. 16 Densitas titik data TLS	56
Gambar 4. 17 Deviasi perbandingan model <i>CTC</i> terhadap model <i>TTT</i>	59
Gambar 4. 18 Grafik distribusi deviasi komparasi model 3D	59
Gambar 4. 19 Grafik prosentase jumlah ICP yang diterima.....	63

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Koordinat Titik Kontrol	40
Tabel 4. 2 Koordinat GCP	41
Tabel 4. 3 Koordinat ICP	41
Tabel 4. 4 Koordinat ICP TLS <i>CTC</i>	51
Tabel 4. 5 Koordinat TLS TTT	51
Tabel 4. 6 Kesalahan Kerangka Kontrol	52
Tabel 4. 7 Perbandingan registrasi berdasarkan perencanaan dan pengambilan data	54
Tabel 4. 8 Rata-rata kesalahan kedua registrasi	54
Tabel 4. 9 Tabel error georeference hasil registrasi <i>Cloud to Cloud</i>	57
Tabel 4. 10 Tabel error georeference hasil registrasi <i>Target to Target</i>	58
Tabel 4. 11 Ukuran geometris candi brahu dari BPCB, <i>CTC</i> , dan TTT	60
Tabel 4.12 Hasil Uji t student pada koordinat X	61
Tabel 4.13 Hasil Uji t student pada koordinat Y	61
Tabel 4.14 Hasil Uji t student pada koordinat Z	62

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran I.....	71
Lampiran II.....	72
Lampiran III.....	73





BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Cagar budaya sebagai tempat terjadinya peristiwa penting atau bersejarah dapat dipergunakan sebagai media penghubung dengan masa lalu dapat dijadikan sarana pembelajaran serta membuka kesadaran pentingnya menghayati proses nilai historis yang tersirat didalamnya. Candi Brahu merupakan salah satu cagar budaya yang berada pada Situs Trowulan.

Situs Trowulan adalah kawasan kepurbakalaan dari periode klasik sejarah Indonesia yang terdiri dari candi, makam, dan kolam. Berbagai temuan-temuan yang diangkat di sini menunjukkan ciri-ciri pemukiman yang cukup maju. Berdasarkan kronik, prasasti, simbol, dan catatan yang ditemukan di sekitar kawasan tersebut, diduga kuat situs ini berhubungan dengan Kerajaan Majapahit. Candi Brahu sendiri terletak pada Dukuh Jambu Mente, Desa Bejjong, Kecamatan Trowulan, Kabupaten Mojokerto, Jawa Timur, atau sekitar dua kilometer ke arah utara dari jalan raya Mojokerto—Jombang (Rohmawi, 1995).

Candi Brahu dibangun dengan gaya dan kultur Budha. Diperkirakan, candi ini didirikan pada abad ke-15 Masehi meskipun masih terdapat perbedaan pendapat mengenai hal ini. Ada yang mengatakan bahwa candi ini berusia jauh lebih tua daripada candi-candi lain di sekitar Trowulan. Situs bersejarah seperti ini harus selalu dirawat dan dijaga agar tetap menjadi warisan negara yang dapat dilihat oleh generasi penerus (Rohmawi, 1995).

Sebuah riset studi internasional *3D Laser Scanning* untuk bangunan cagar budaya dilakukan oleh Barber dan Mills (2007) dengan objek riset yang dimodelkan adalah objek arkeologi industri di Lion Salt Works, Inggris. Objek ini merupakan bekas kompleks pabrik pembuatan garam yang dijadikan museum dan sudah dibangun sejak abad ke-19. Riset dalam penggunaan *Terrestrial Laser Scanner* untuk bangunan cagar budaya juga

dilakukan oleh Riawan (2013) dengan memodelkan Monumen Bandung Lautan Api secara 3D.

Dapat disimpulkan bahwa salah satu bentuk pelestarian, perawatan, dan pengarsipan yang bisa dilakukan adalah dengan melakukan pemodelan 3D dari Candi Brahu maka, model tersebut bisa dijadikan sebagai acuan atau referensi untuk melakukan rekonstruksi Candi tersebut jika terjadi bencana alam atau peristiwa yang bisa merubah bentuk dari Candi tersebut. Pada tugas akhir kali ini pemodelan 3D dilakukan dengan menggunakan TLS (Terrestrial Laser Scanner).

Teknologi laser scanning adalah salah satu teknik terbaru untuk melakukan pekerjaan survei tiga dimensi. Kelebihan dari teknologi ini adalah hal tersebut dirancang untuk melakukan akuisisi 3 dimensi (3D). Model 3 dimensi ini memungkinkan untuk mengakses banyak data geometris dan visual yang diperlukan. Dengan demikian, penggunaan TLS telah meningkat pesat dan saat ini telah diterapkan di banyak bidang seperti mendokumentasikan warisan budaya, pengukuran deformasi, aplikasi perencanaan, kontrol kualitas, produksi prototipe, analisis Tempat Kejadian Perkara (TKP) dan industri pembuatan film (Alkan, 2012).

Pembuatan model sebuah objek menggunakan alat TLS terdiri dari beberapa tahapan yang terdiri dari tahap perencanaan, tahap pengambilan data, tahap registrasi data, dan tahap pemodelan 3 dimensi. Dari tahapan pemodelan tersebut, tahapan yang paling menentukan dari pemodelan tiga dimensi adalah tahapan registrasi data, karena tahapan registrasi data adalah tahapan penggabungan hasil data laser scanner dari beberapa berdiri alat.

Registrasi data menggunakan TLS tersebut terdiri dari beberapa metode. Jenis – jenis metode registrasi yang ada tersebut adalah metode *Target to Target*, *Cloud to Cloud*, dan *traverse*. Studi kali ini akan mengkaji jenis registrasi *Cloud to Cloud* dan *Target to Target* untuk mengetahui metode pengambilan dan perencanaan yang efektif.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah yang ingin diselesaikan dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana cara membuat pemodelan 3D model dari Candi Brahu menggunakan teknologi TLS berdasarkan proses registrasi *Target to Target* dan *Cloud to Cloud*?
2. Bagaimana ketelitian (akurasi) koordinat (X, Y, Z) ICP dari model hasil *Terrestrial Laser Scanner* tersebut apabila dibandingkan dengan koordinat ICP yang didapat dari *total station*?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Peninggalan bersejarah yang akan dijadikan objek penelitian adalah Candi Brahu yang berada di Desa Bejijing, Kecamatan Trowulan, Kabupaten Mojokerto.
2. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Terrestrial Laser Scanning* dengan registrasi *Target to Target* dan *Cloud to Cloud*.
3. *Terrestrial laser scanner* yang akan digunakan adalah GeoMax Zoom 300.
4. Analisa akan dilakukan terhadap perbedaan koordinat (X, Y, Z) ICP dari model yang dihasilkan
5. Data pembanding yang digunakan adalah koordinat (X, Y, Z) ICP yang didapat menggunakan *total station*.

1.4 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Membuat pemodelan 3D model dari Candi Brahu dengan menggunakan *Terrestrial Laser Scanning* berdasarkan dengan registrasi *Target to Target* dan *Cloud to Cloud*.

2. Melakukan analisa terhadap koordinat (X, Y, Z) ICP dari kedua model yang dihasilkan berdasarkan ukuran *total station*.

1.5

Manfaat

Manfaat yang ingin diperoleh dari penelitian ini adalah memberi pengetahuan mengenai pemodelan menggunakan *Terrestrial Laser Scanning*, dan pertimbangan pemilihan metode registrasi yang sesuai kondisi yang ada dalam melakukan dokumentasi 3D peninggalan bersejarah. Model 3D yang dihasilkan bisa digunakan sebagai arsip yang nantinya akan berguna apabila harus dilakukan rekonstruksi. Model 3D yang dihasilkan juga bisa digunakan sebagai sarana promosi bagi Kabupaten Mojokerto untuk menarik berbagai wisatawan dan diharapkan mampu memberi peningkatan di sektor hiburan Kabupaten Mojokerto.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengukuran Teristis

2.1.1 Pengukuran Detil

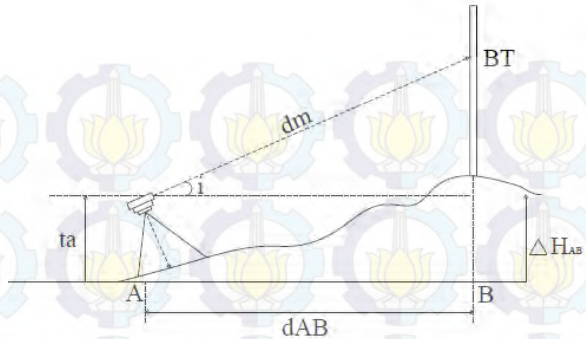
Detil adalah segala objek yang bersifat alamiah seperti sungai, lembah, bukit, alur, dan rawa, maupun hasil budaya manusia seperti jalan, jembatan, gedung, lapangan, stasiun, selokan, dan batas-batas pemilikan tanah yang akan dijadikan isi dari peta yang dibuat (Basuki, 2006). Ada beberapa metode pengukuran titik detil, antara lain :

- Metode offset
- Metode polar (tachimetry)
- Metode perpotongan ke muka

2.1.2 Kerangka Kontrol Vertikal Metode Trigonometri

Metode trigonometris prinsipnya adalah mengukur jarak langsung (jarak miring), tinggi alat, tinggi benang tengah rambu dan sudut vertikal (zenith atau inklinasi) yang kemudian direduksi menjadi informasi beda tinggi menggunakan alat theodolite (Muda, 2008).

Adapun ilustrasi metode trigonometri dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Ilustrasi Metode Trigonometri
(Sumber: Muda, 2008)

$$d_{AB} : dm \cdot \cos i \dots\dots\dots(2.1)$$

$$\Delta H_{AB} : dm \cdot \sin i + ta - BT \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan:

i : sudut miring

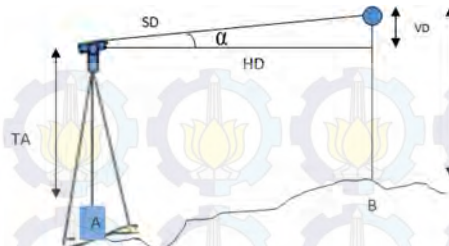
ΔH_{AB} : Beda tinggi titik A dengan B

2.1.3 Metode Tachimetry

Tachymetry berasal dari kata dasar tacheo, yang berarti cepat dan metry, yang berarti pengukuran (Basuki, 2006). Di Amerika lebih dikenal dengan nama Stadia Method. Metode yang digunakan untuk menentukan dengan cepat jarak horizontal dan elevasi sebuah titik (Wolf P. R., 2001). Metode ini dibagi menjadi :

- Pengukuran dengan azimuth
- Pengukuran dengan sudut

Adapun ilustrasi rumus dasar tachymetry dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Electronic Total Station Rumus Dasar Tachymetry
(Sumber : Basuki, 2006)

Persamaan rumus dasar tachymetry:

$$HD = SD \cdot \cos \alpha \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\Delta H_{AB} = TA + VD - Rht \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan :

HD : jarak horizontal

SD : jarak miring

α : sudut

TA : tinggi alat

VD : jarak vertical

Rht : tinggi jalon

2.1.4 Toleransi Kesalahan Sudut

Bobot toleransi didekati dengan cara perbandingan jarak pada suatu ruas garis terhadap jarak total poligon dari awal sampai akhir pengukuran (Muda, 2008).

Kesalahan pengukuran sudut:

$$f\beta = [(n-2) \cdot 180^\circ] - \Sigma \dots\dots\dots (2.5)$$

$$f\beta \leq T \sqrt{n} \dots\dots\dots (2.6)$$

Keterangan:

$f\beta$: kesalahan pengukuran sudut

n : jumlah titik

$\Sigma\beta$: jumlah sudut dalam

$T\sqrt{n}$: Toleransi

2.1.5 Toleransi Kesalahan Linier

Jika digunakan jarak optis, maka digunakan ketelitian jarak linier 1/2500 (Muda, 2008). Maka toleransi kesalahan linier adalah:

$$\frac{\sqrt{fx+fy^2}}{(\sum d)} \leq \frac{1}{2500} \dots\dots\dots(2.7)$$

Keterangan:

fx : total koreksi absis

fy : total koreksi ordinat

$\sum d$: total jarak poligon

2.2 Terrestrial Laser Scanning

Terrestrial Laser Scanning (TLS) adalah sebuah teknik menggunakan cahaya laser untuk mengukur titik-titik dalam sebuah pola secara langsung dalam tiga dimensi dari yang ada pada permukaan objek dari sebuah tempat di permukaan bumi. Hasil yang didapatkan dari pengukuran TLS ini adalah *point clouds* yang berkoordinat tiga dimensi terhadap tempat berdiri alat. *Point clouds* tersebut adalah kumpulan titik-titik dalam jumlah banyak yang dapat digunakan sebagai bahan pembuatan model tiga dimensi. TLS ini mempunyai kekurangan yaitu ketidakmampuan TLS dalam mengakuisisi warna yang sesuai dengan warna aslinya. Warna yang didapatkan oleh alat TLS adalah intensitas pantulan dari benda yang ditembak oleh laser tersebut (Quintero, Genechten, Heine, & Garcia, 2008).

Menurut (Reshetyuk, 2009), TLS memiliki beberapa keunggulan bila dibandingkan dengan teknik survei tradisional lainnya seperti tachimetri, GPS, dan fotogrametri, yaitu:

1. Menangkap geometri suatu objek dalam 3-D secara langsung, cepat dan detil.

2. Dapat memangkas biaya dan dapat menyelesaikan pekerjaan jauh lebih cepat.
3. Dapat digunakan pada daerah survei atau objek yang sulit dijangkau dan berbahaya di mana teknik survei tradisional sangat sulit untuk dilakukan.
4. Tidak memerlukan cahaya untuk dapat mengakuisisi data.
5. Pemindaian yang secara lengkap dan komprehensif.
6. Data dapat digunakan untuk saat ini dan masa yang akan mendatang.

TLS juga memiliki kekurangan, yaitu tidak mampu untuk mengambil warna sesuai dengan warna tampak objek, melainkan warna yang didapatkan hanya warna intensitas dari gelombang pantulan (Quintero, Genechten, Heine, & Garcia, 2008).

2.2.1 Prinsip Pengukuran TLS

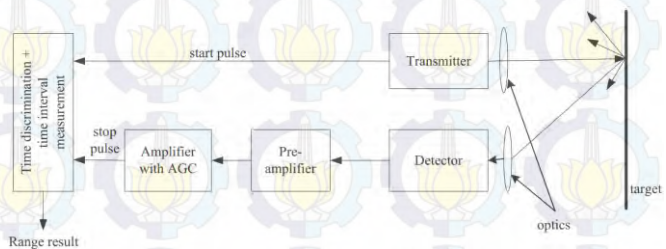
TLS mempunyai suatu sistem pengukuran yang terdapat di dalamnya, yaitu sistem pengukuran jarak dan sistem pengukuran sudut. Sistem pengukuran ini digunakan untuk mendapatkan koordinat *point clouds*.

Laser *rangefinder* merupakan suatu komponen TLS yang paling berperan dalam melakukan pengukuran jarak. Pulsa laser *rangefinder* terdiri dari:

1. *Transmitter* atau pemancar pulsa
2. Penerima pulsa (terdiri dari detektor, penguat sinyal, dan *Automatic Gain Control* (AGC))
3. Pengukur waktu elektronik, unit pengukur waktu (*Time- to-digital converter* (TDC))
4. Pemancar dan penerima optis.

Mekanisme pengukuran berbasis pulsa dari laser *rangefinder* yaitu pemancar laser memancarkan dalam pulsa pendek yang terbagi

menjadi dua bagian, satu dipancarkan ke penerima sinyal untuk mengaktifkan unit pengukur waktu elektronik, satu lagi dipancarkan ke objek. Ketika laser yang dipancarkan menyentuh objek, laser tersebut akan terhamburkan dan sebagian ada yang kembali ke detektor. Di dalam detektor kekuatan pancaran pulsa akan dikonversikan menjadi arus listrik yang kemudian akan diterima dan diteruskan oleh penguat sinyal yang disebut diskriminator waktu. Saat arus listrik mencapai diskriminator waktu, hal tersebut menandakan waktu kembalinya pulsa dan akan menghentikan pengukuran waktu. Interval waktu antara pulsa dipancarkan hingga kembali digunakan untuk menghitung jarak antara alat TLS dengan objek. Mekanisme pengukuran menggunakan TLS berbasis pulsa akan diilustrasikan pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 3 Mekanisme pengukuran TLS

Sumber: (Reshetyuk, 2009)

Menurut Reshetyuk (2009), perhitungan jarak dengan TLS berbasis pulsa mengikuti pada persamaan 2.6.

$$R = \frac{c \cdot t}{2}$$

(2.8)

dengan:

R : jarak antara TLS dengan objek (m);

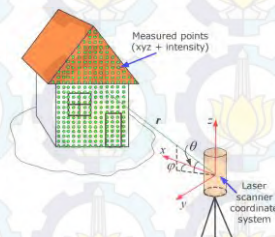
c : kecepatan cahaya di udara ($\approx 3 \cdot 10^8$ m/s);

t : waktu tempuh laser ketika dipancarkan hingga diterima (s).

Selain sistem pengukuran jarak, TLS juga mempunyai sistem pengukuran sudut yang dapat digunakan untuk mendapatkan koordinat objek. Sistem pengukuran sudut terdiri dari *angular recorders* yang berfungsi untuk mengukur arah horizontal dan sudut vertikal sinar laser TLS ke objek. Untuk mendapatkan nilai koordinat objek dengan menggunakan TLS, adapun beberapa parameter yang diukur dalam setiap objek, yaitu:

1. jarak R (m);
2. arah horizontal (φ);
3. sudut vertikal θ ($^\circ$).

Selain melakukan ketiga pengukuran di atas terhadap setiap objek, TLS juga melakukan pengukuran intensitas pantulan sinar laser dari setiap *point clouds*. Prinsip pengukuran TLS akan diilustrasikan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.4 Prinsip pengukuran TLS

Sumber: (Reshetyuk, 2009)

Hubungan antara data pengamatan (r , φ , θ) dan koordinat (e , n , u) dapat dituliskan dalam persamaan 2.2 (Reshetyuk, 2009):

$$X_i = \begin{bmatrix} e_j \\ n_j \\ u_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_j \cos \varphi_j \cos \theta_j \\ r_j \sin \varphi_j \cos \theta_j \\ r_j \sin \theta_j \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

dengan:

r_j : jarak hasil pengukuran waktu tempuh laser ke objek (m)

φ_j : sudut horizontal antara arah bidikan laser dengan sumbu-e alat ($^\circ$)

θ_j : sudut vertikal antara bidang horizontal dengan arah bidikan laser ($^\circ$)

e_j : koordinat e *point clouds* dalam sistem koordinat alat (m)

n_j : koordinat n *point clouds* dalam sistem koordinat alat (m)

u_j : koordinat u *point clouds* dalam sistem koordinat alat (m)

2.2.2 Klasifikasi *Terrestrial Laser Scanner*

Terrestrial Laser Scanner (TLS) dibagi ke dalam dua kategori utama, yaitu TLS Dinamis dan TLS Statis. TLS Dinamis merupakan tipe TLS yang pengukurannya atau penggunaannya dilakukan dari atas wahana atau kendaraan yang bergerak. Penggunaan TLS dinamis ini lebih difokuskan kepada citra yang diperoleh dengan menggunakan beberapa video dan kamera digital yang dioperasikan secara bersamaan untuk tujuan geo-referensi langsung dan diintegrasikan dengan sistem GPS/IMU sebagai koreksi langsung data pengukuran (Adhitiaputra, 2013). TLS dinamis

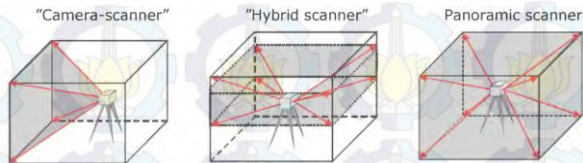
dapat digunakan untuk pemindaian darat ketika wahana yang digunakan bergerak atau juga dapat disebut *vehicle laser scanning*.

TLS Statis merupakan tipe TLS untuk pengukuran objek topografi yang pengukurannya dilakukan dari posisi yang tetap/diam. TLS ini melakukan pengukuran dengan mengukur jarak miring yang dilakukan dengan menggunakan laser *rangefinder* dan dua sudut yang berasosiasi dengan *encoder* sudut pada bidang horizontal dan vertikal melewati pusat dari alat. Biasanya penggunaan TLS jenis ini digunakan dalam pengukuran terhadap objek yang diam.

TLS jenis statis dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa kategori, seperti ditinjau dari prinsip pengukuran, cakupan pemindaian, dan jarak tempuh laser yang digunakan. Berdasarkan prinsip pengukurannya Pengukuran jarak dengan TLS dilakukan menggunakan laser *rangefinder* dengan prinsip pengukuran berbasis pulsa atau beda fase. *Pulse Based* TLS memiliki tipe pengukuran jarak dengan menggunakan waktu tempuh laser mulai dipancarkan hingga kembali lagi ke alat. TLS ini dapat digunakan untuk pengukuran dengan jarak objek yang cukup jauh. *Phase Difference Based* TLS memiliki tipe pengukuran jarak dengan menggunakan perbedaan fase laser saat dipancarkan dengan saat laser diterima kembali oleh alat. TLS ini biasanya hanya digunakan pada pengukuran dengan jarak yang cukup dekat, namun memiliki tingkat presisi yang lebih baik bila dibandingkan dengan TLS berbasis pulsa (Putra, 2014).

Berdasarkan cakupan pemindaian atau *Field of View* (FOV) terdapat tiga jenis TLS,

yaitu *Panoramic Scanner*, *Hybrid Scanner*, dan *Camera Scanner*. Perbedaan dari tiga jenis TLS dalam kategori ini akan diilustrasikan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Perbedaan 3 jenis TLS
Sumber: (Reshetyuk, 2009)

2.2.3 Teknik Registrasi Data

Karena kebanyakan objek tidak bisa di *scan* dari satu sudut pandang, dikarenakan hambatan dan halangan penglihatan, *laser scanner* harus di posisikan pada lokasi yang berbeda agar bisa melakukan *scan* secara keseluruhan. Data yang di dapat *laser scanner* dari setiap sudut pandang mengacu kepada sistem koordinat lokal. Tujuannya adalah melakukan transformasi yang menyatukan referensi koordinat dari beberapa data, yang biasa disebut registrasi. Transformasi antara dua sistem koordinat yang berbeda \vec{x}_g dan \vec{x}_l bisa di deskripsikan secara matematis menggunakan *rigid body transformation* (Schluz, 2007).

$$\vec{x}_g = R \cdot \vec{x}_l + \vec{t} \quad (2.10)$$

Di mana:

\vec{x}_g : vektor koordinat dalam sistem koordinat global

\vec{x}_1 : vektor koordinat dalam sistem koordinat lokal

R : matriks rotasi

\vec{t} : komponen translasi

Selanjutnya, faktor skala, atau matriks skala dari sumbu yang berbeda bisa diberikan. Biasanya, matriks rotasi merupakan matriks yang ortogonal, di mana harus memenuhi 3 syarat (Schluz, 2007).

$$\begin{aligned} R^T &= R^{-1} \\ R \cdot R^T &= R^T \cdot R = I \\ \det R &= \pm 1 \end{aligned} \quad (2.11)$$

Di mana:

R : Matriks rotasi

R^T : tranpose dari matriks rotasi

R^{-1} : inverse dari matriks rotasi

Ada beberapa metode registrasi data *point clouds* yang bisa digunakan, teknik registrasi yang dipilih akan mempengaruhi teknik survei yang akan dilakukan nantinya sehingga harus dipilih dengan seksama berdasarkan kondisi objek dan area di sekitar objek (Quintero, Genechten, Heine, & Garcia, 2008).

1. *Target to Target registration*

Metode registrasi ini adalah metode registrasi yang umum digunakan. Target yang digunakan dalam metode ini adalah target yang mempunyai reflektivitas tinggi dan dapat dikenali oleh alat sebagai target. Target tersebut digunakan sebagai titik ikat

dari dua atau lebih tempat berdiri alat. Titik ikat tersebut yang menggabungkan kedua tempat berdiri alat sehingga mempunyai arah orientasi relatif yang sama.

2. *Cloud to Cloud registration*

Registrasi ini menggunakan minimal 3 titik sekutu yang dimiliki dari kedua hasil *scan*. Konsep registrasi ini menggunakan metode *iterative closest point* (ICP). Maksud dari konsep ini adalah mencari *offset* atau jarak terdekat secara berulang – ulang dari kedua titik yang terdekat antara kedua kumpulan *point clouds*. Walaupun titik minimal yang diperlukan berjumlah 3 titik, namun untuk mendapatkan ketelitian yang baik, pertampalan dari *point clouds* harus di atas 60% sehingga akan menambah beban kerja pada proses pengambilan data.

3. *Traversing*

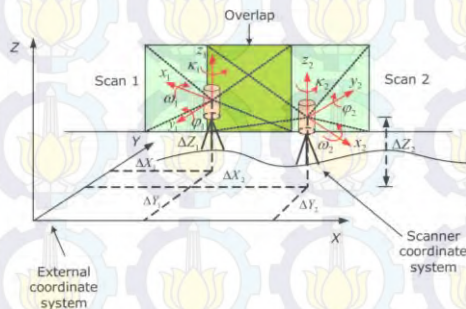
Registrasi *traversing* menggunakan tempat berdiri alat sebagai titik sekutu dan memerlukan satu titik referensi sebagai titik awal *backsight*. Keunggulan metode ini adalah lebih cepat dalam menyelesaikan survei karena waktu untuk persiapan alat dan target tidak terlalu lama. Akan tetapi metode ini biasanya memberikan ketelitian pengukuran yang lebih rendah dibandingkan dengan metode lainnya.

2.2.4 *Georeferencing*

Dalam pengukuran dengan *laser scanner*, diperlukan model yang memiliki koordinat yang telah bergeoreferensi (koordinat yang mengacu pada sistem koordinat bumi) (Nugraha, 2013).

Untuk mendapatkan data yang bergeoreferensi, maka diperlukan titik referensi yang memiliki koordinat geodetik dengan ketelitian yang baik. Ketelitian yang baik diperlukan karena ketelitian dari titik referensi akan mempengaruhi ketelitian nilai koordinat dari semua titik yang dihasilkan oleh pengukuran *laser scanner* (Quintero, Genechten, Heine, & Garcia, 2008).

Untuk melakukan *georeferencing*, terdapat dua cara yang umum digunakan dalam pengukuran dengan *laser scanner*, yaitu *known backsight* dan *known azimuth*. Seperti namanya, pada *known backsight*, yang diperlukan adalah dua buah titik referensi yang koordinatnya diketahui di mana yang satu berfungsi sebagai titik awal dan yang satu lagi berfungsi sebagai titik *backsight*. Sedangkan pada *known azimuth*, yang perlu diketahui hanyalah nilai koordinat titik awal dan nilai *azimuth* dari titik awal ke titik lainnya. Untuk penggunaan kedua metode tersebut di lapangan, kedua titik tersebut harus dapat terlihat satu sama lain (Quintero, Genechten, Heine, & Garcia, 2008).



Gambar 2.6 Hubungan sistem koordinat pada TLS Sumber: (Reshetyuk, 2009)

2.2.5 Rekonstruksi Permukaan dan Pemodelan

Untuk membentuk *point clouds* diawali dengan proses *data point measurement* (pengukuran data) yang dapat dilakukan dengan menggunakan alat dan metode apapun yang dapat memberikan data bentuk dari suatu objek yang dikaji. Kemudian *data point measurement* itu menghasilkan *point – point* yang menggambarkan permukaan dari objek yang biasanya disebut dengan *point clouds*. Kemudian *point clouds* itu dapat digunakan untuk membentuk model 3D. Berikut 3 jenis model yang dapat dibentuk pada proses *3D modelling* (Barnes, 2012), yaitu:

1. *Mesh Model*

Segitiga merupakan bentuk paling sederhana yang membentuk *polygon*. *Polygonal modelling (Meshing)* di sini menggunakan *point clouds* yang sudah dibuat dari hasil *dense surface* sebelumnya. Kemudian *point clouds* tersebut ditarik garis antar dia titik (*edge*). Dari tiga *edge* yang terhubung dapat terbentuk segitiga. *Polygon* dengan empat sisi dan segitiga adalah yang sering digunakan untuk *meshing*. Karena itu sekelompok poligon yang terhubung satu sama lain dengan titik yang sama dinamakan *mesh*.

2. *Solid Model*

Solid model adalah badan 3D yang tertutup yang memiliki properti atau atribut berupa massa, volume, titik tengah gravitasi, dan momen inersia, dimulai dari solid bentuk primitif seperti bentuk kerucut, kotak,

silinder dan piramid yang kemudian dimodifikasi dan dikombinasi untuk membentuk suatu bentuk baru. Dapat juga dengan menggambarkan *ekstrusi polysolid* (bentuk solid seperti menggambar *polyline* atau yang berbasis garis).

3. *Surface Model*

Surface model merupakan cangkang tipis yang tidak memiliki massa atau volume. Biasanya terbagi menjadi *procedural* dan NURBS (*non-uniform rational B-splines*). *Procedural* digunakan untuk mendapatkan pemodelan asosiatif. Sedangkan NURBS untuk dapat melakukan pemahatan dengan titik – titik kontrol simpul. Dalam pemodelan *surface*, model ini diawali dengan membuat model dasar menggunakan *mesh*, solid dan *prosedural surface* kemudian di konversi menjadi NURBS *surfaces*. Hal ini dimaksudkan tidak hanya agar dapat memanfaatkan *tools* unik dan bentuk primitif yang ditawarkan oleh solid dan *mesh model*, tapi juga kemampuan untuk mengubah bentuk yang diberikan oleh *surface model* pemodelan asosiatif dan NURBS *modelling*.

2.2.6 *Noise Filtering*

Langkah pertama dalam proses *meshing* adalah menghilangkan data *noise* dari *point clouds*. *Mesh* akan berisi segitiga yang menghubungkan *noisy point* ini untuk membenarkan *points*. Hal ini akan menghasilkan *mesh* yang penuh dengan *spike*. Oleh karena itu menghilangkan *noisy point* ini merupakan hal

yang penting (Quintero, Genechten, Heine, & Garcia, 2008).

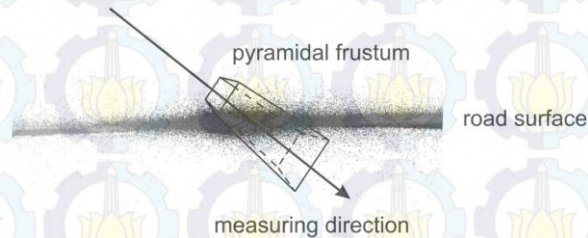
Algoritma otomatis untuk menghilangkan *noisy points* biasanya berdasarkan dua prinsip. Prinsip yang pertama adalah titik yang memiliki sedikit atau tidak ada titik lain di sekitarnya, dianggap sebagai objek asing. Mereka biasanya berasal dari orang atau benda lain yang bergerak di depan *scanner* saat sedang proses *scanning* dan bukan merupakan bagian dari objek yang di *scan*. Titik seperti ini bisa diidentifikasi dengan mudah menggunakan beberapa setelan parameter dan dihilangkan dari *point clouds* (Quintero, Genechten, Heine, & Garcia, 2008).

Prinsip penghilangan *noise* lainnya adalah dengan menggerakkan titik sedikit untuk mendapatkan kehalusan permukaan yang optimal. Algoritma ini mencoba untuk mencocokkan bidang secara lokal terhadap titik di *point clouds*. Ketika titik pusat berada sangat jauh dari bidang yang dicocokkan, titik pusat dipindahkan ke arah bidang sehingga memberikan konsistensi bagi tetangganya (Quintero, Genechten, Heine, & Garcia, 2008).

Terdapat *noise filter* lainnya, beberapa yang khusus berdasarkan tipe *scanner*, yang lain menghilangkan kesalahan sistematis. Tentu saja saat menghilangkan *noisy points* harus berhati-hati. Fitur bisa hilang ketika *dataset* dihaluskan secara berlebihan atau menghilangkan terlalu banyak titik (Quintero, Genechten, Heine, & Garcia, 2008).

Sebagai contoh, sekumpulan data yang memiliki bias bisa di lihat di gambar 2.5. *Noise* dari data umumnya disebabkan oleh sudut kecil

insiden dan warna permukaan yang gelap. *Pyramidal frustum* dibuat sepanjang arah pengukuran. Tinggi dari *pyramidal frustum* di buat untuk menentukan ketebalan dari *noise*.



Gambar 2.7 Pendekatan Noise Filtering

Sumber: (Schluz, 2007)

2.2.7 Self-Calibration of Terrestrial Laser Scanner

Kesalahan sistematis bisa terdapat pada alat *terrestrial laser scanner* modern meskipun setelah adanya kalibrasi laboratorium yang teliti oleh manufaktur. Sejumlah penelitian telah dilakukan secara independen untuk menemukan kecenderungan sistematis pada residu *laser scanner* yang memperburuk presisi dan akurasi jarak dan sudut dari pengukuran *laser scanner* (Chow, Lichti, & Teskey, 2010).

Meskipun kebanyakan dari instrumen TLS memberikan *output* informasi spasial dalam sistem koordinat kartesian (x , y , dan z), data mentah dari pengukuran menggunakan sistem koordinat bola (ρ , θ , dan α). Sistem TLS modern beroperasi seperti *total station* dengan mekanisme *scanning* tambahan. TLS mengukur arah horizontal, vertikal, dan jarak ke satu titik, dan kumpulan dari titik ini akan menghasilkan sesuatu yang dikenal sebagai *point cloud*. Sebuah

kemiripan dalam instrumentasi ini memungkinkan pemodelan kesalahan sistematis dari TLS berdasarkan prinsip *total station*, yang telah banyak di eksplorasi (Chow, Lichti, & Teskey, 2010).

2.3 Kualitas Pemodelan 3 Dimensi

Kualitas pekerjaan pemodelan bangunan 3 dimensi dapat dikaji secara kuantitatif maupun secara visual atau kualitatif. Secara kuantitatif dapat dinyatakan dengan besaran *Root Mean Square Error (RMSE)* dan standar deviasi.

2.3.1 Root Mean Square Error dan Standar Deviasi

Root Mean Square Error (RMSE) adalah ukuran perbedaan antara nilai besaran yang diprediksi dengan nilai yang diamati sebenarnya. RMSE adalah ukuran akurasi dari suatu prediksi besaran dan didefinisikan dengan persamaan:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2}{n}} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana $x_{1,i}$ adalah nilai prediksi ke i , $x_{2,i}$ adalah nilai pengamatan ke i , dan n adalah jumlah pengamatan.

Sedangkan standar deviasi lebih enunjukkan kecenderungan penyebaran nilai suatu prediksi terhadap nilai prediksi rata-ratanya sendiri. Standar deviasi adalah ukuran dari tingkat presisi dan didefinisikan dengan persamaan:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana \bar{x} adalah nilai rata-rata prediksi dan x_i adalah nilai prediksi ke i .

2.4 Uji Statistik *t-student*

Dalam melakukan uji hipotesis, ada banyak faktor yang menentukan, seperti apakah sampel yang diambil berjumlah banyak atau hanya sedikit, apakah standar deviasi populasi diketahui, apakah varians populasi diketahui, metode parametrik apakah yang dipakai, dan seterusnya (Ghilani & Wolf, 2006).

Langkah – langkah untuk menguji suatu hipotesis adalah sebagai berikut:

1. Menentukan hipotesa nol (H_0) dan hipotesa alternatif (H_a). H_0 merupakan hipotesis nilai parameter yang dibandingkan dengan hasil perhitungan dari sampel. H_0 ditolak hanya jika hasil perhitungan dari sampel tidak mungkin memiliki kebenaran terhadap hipotesis yang ditentukan. H_a diterima jika H_0 ditolak.
2. Menentukan tingkat signifikansi yang digunakan. Tingkat signifikansi merupakan standar statistik yang digunakan untuk menolak H_0 . Jika ditentukan tingkat signifikansi 10% ($\alpha = 0,1$), H_0 ditolak hanya jika hasil perhitungan dari sampel sedemikian berbeda dengan nilai dugaan (yang dihipotesakan).
3. Memilih uji statistik.
4. Menentukan statistik tabel. Nilai statistik tabel dipengaruhi oleh:
 - Tingkat kepercayaan
 - Derajat kebebasan
 - Jumlah sampel yang didapat
5. Menentukan statistik hitung.
6. Mengambil keputusan.

Uji-t termasuk dalam golongan statistika parametrik. Statistik uji ini digunakan dalam pengujian hipotesis. Uji-

t digunakan ketika informasi mengenai nilai varians (ragam) populasi tidak diketahui. Rumus yang digunakan dalam uji-t adalah sebagai berikut:

$$t = \frac{\Sigma d}{\sqrt{\frac{N\Sigma d^2 - (\Sigma d)^2}{N - 1}}} \quad (2.14)$$

Di mana:

t = t-hitung

Σd = Jumlah Selisih Tiap Titik

N = Jumlah Titik yang Digunakan

Σd^2 = Jumlah dari Kuadrat Selisih Tiap Titik

$(\Sigma d)^2$ = Kuadrat dari Jumlah Selisih Tiap Titik

2.5

Desain Kekuatan Jaring

Strength of figure adalah kekuatan dari bentuk kerangka yang digunakan untuk menentukan kekuatan kerangka dari jaring 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, di mana 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 jaring tersebut adalah dengan mencari salah satu kemungkinan yang didapat dengan metode kuadrat terkecil (*least square*).

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

$$V + B = X_B + X_A \quad (2.15)$$

Di mana 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:

$$V = [-11] \cdot \begin{bmatrix} X_B \\ X_A \end{bmatrix} - B \quad (2.16)$$

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

$$\begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \\ X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} dX_{AB} \\ dY_{AB} \\ dZ_{AB} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

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

$$V = AX - L \quad (2.18)$$

Di mana V adalah vektor residu, A adalah matriks desain, X adalah vektor parameter, dan L adalah vektor pengamatan. Sedangkan untuk suatu vektor *baseline* yang terikat, di mana salah satu titik ujungnya merupakan titik

kontrol dan X_A sudah diketahui harganya, maka persamaan pengamatannya menjadi seperti berikut:

$$\begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_A + dX_{AB} \\ Y_A + dY_{AB} \\ Z_A + dZ_{AB} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

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

$$\begin{aligned} X &= [A^T P A]^{-1} \cdot A^T P F \\ P &= Q_L^{-1} = \sigma^2 \cdot C_L^{-1} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Di mana

P = matriks berat dari pengamatan

Q_L = matriks kofaktor pengamatan

σ^2 = faktor variansi apriori

Q_L = matriks variansi kovariansi (VCV) pengamatan

Geometri dari suatu jaringan dapat di karakterisir 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:

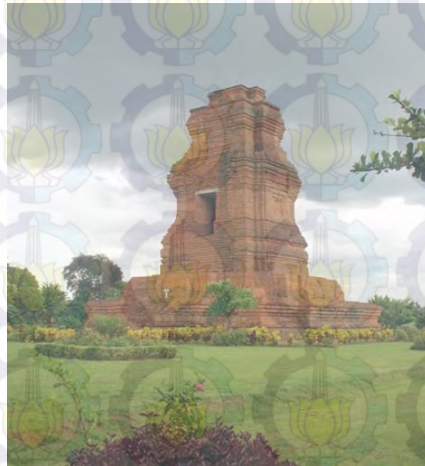
$$SOF = \frac{\text{trace}(A^T \cdot A)^{-1}}{u} \quad (2.21)$$

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

2.6 Candi Brahu

2.7.1 Nama

Candi Brahu merupakan salah satu candi yang terletak di dalam kawasan situs arkeologi Trowulan, bekas ibu kota Majapahit. Tepatnya, candi ini berada di Dukuh Jambu Mente, Desa Bejjong, Kecamatan Trowulan, Kabupaten Mojokerto, Jawa Timur, atau sekitar dua kilometer ke arah utara dari jalan raya Mojokerto—Jombang. Nama candi ini, yaitu 'brahu', diduga berasal dari kata wanaru atau warahu. Nama ini didapat dari sebutan sebuah bangunan suci yang disebut dalam Prasasti Alasantan. Prasasti tersebut ditemukan tak jauh dari Candi Brahu.



Gambar 2. 8 Candi Brahu
(Sumber: id.wikipedia)

2.7.2 Uraian Bangunan

Candi Brahu dibangun dengan batu bata merah, menghadap ke arah barat dan berukuran panjang sekitar 22,5 m, dengan lebar 18 m, dan berketinggian 20 meter. Candi Brahu dibangun dengan gaya dan kultur Budha. Diperkirakan, candi ini didirikan pada abad ke-15 Masehi meskipun masih terdapat perbedaan pendapat mengenai hal ini. Ada yang mengatakan bahwa candi ini berusia jauh lebih tua daripada candi-candi lain di sekitar Trowulan.

2.7.3 Fungsi Candi Brahu

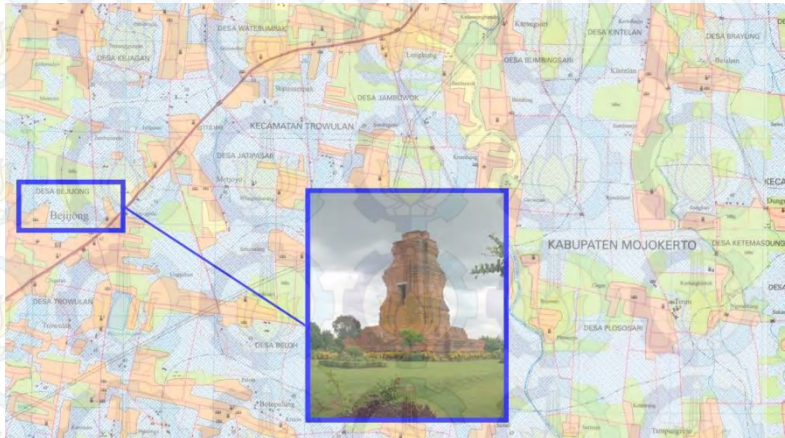
Dalam prasasti yang ditulis Mpu Sendok bertanggal 9 September 939 (861 Saka), Candi Brahu disebut merupakan tempat pembakaran (krematorium) jenazah raja-raja. Akan tetapi, dalam penelitian tak ada satu pakar pun yang berhasil menemukan bekas abu mayat dalam bilik candi. Hal ini diverifikasi setelah dilakukan pemugaran candi pada tahun 1990 hingga 1995. Diduga di sekitar candi ini banyak terdapat candi-candi kecil. Sisa-sisanya yang sebagian sudah runtuh masih ada, seperti Candi Muteran, Candi Gedung, Candi Tengah, dan Candi Gentong. Saat penggalian dilakukan di sekitar candi banyak ditemukan benda-benda kuno, semacam alat-alat upacara keagamaan dari logam, perhiasan dari emas, arca, dan lain-lainnya.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian adalah Candi Brahu yang berlokasi pada Desa Bejijong, Kec. Trowulan, Kab. Mojokerto dengan koordinat $07^{\circ} 32' 34,9''$ LS dan $112^{\circ} 22' 23,2''$ BT. Candi ini dipilih sebagai objek pemodelan karena candi ini merupakan peninggalan bersejarah yang memiliki nilai budaya dan sejarah yang tinggi di daerah Jawa Timur.



Gambar 3. 1 Lokasi Penelitian: Candi Brahu

3.2 Data dan Peralatan

3.2.1 Data

Data yang digunakan dalam tugas akhir ini antara lain:

- Data *3D point clouds* candi yang didapatkan dari pengukuran lapangan menggunakan *Terrestrial Laser Scanner*.

- Data ukuran kerangka kontrol pengukuran lapangan menggunakan *Electronic Total Station*.
- Data ukuran koordinat (X, Y, Z) GCP dan ICP pada candi dari pengukuran lapangan menggunakan *Electronic Total Station*.
- Data koordinat BM candi dari Balai Pelestarian Cagar Budaya Mojokerto
- Data spesifikasi Terrestrial Laser Scanner GEOMAX ZOOM300 yaitu sebagai berikut:
- Data spesifikasi Total Station Topcon GTS 235S

3.2.2 Peralatan

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

1. *Hardware*

- *Terrestrial Laser Scanner* GeoMax Zoom 300



Gambar 3. 2 *Terrestrial Laser Scanner GeoMax Zoom 300* (Sumber: Geomax Corp.)

- Maksimal rata 300m
- Rata-rata pemindaian 40.000 points/sec
- Akurasi Densitas 6mm @ 50m
- Akurasi Ranging Error $\leq 2.35\text{cm}$ @ 0~30m
- 2 kamera terintegrasi 5+5 Mpx
- Integrasi dengan data GPS
- Laser class 1 – aman tanpa proteksi mata
- Kuat dan ringan (7 kg termasuk baterai)
- Lebih dari 6 jam dalam pekerjaan berkelanjutan dengan 2 baterai yang tersedia
- Temperatur pengoperasian dari suhu -10°C sampai $+50^{\circ}\text{C}$

➤ Wi-Fi– mengoperasikan pemindai langsung dari PC atau Smartphone

- *Total station* Topcon GTS-235 beserta kelengkapan dan aksesoris untuk pengukuran koordinat titik kontrol



Gambar 3. 3 TOPCON GTS-235

(Sumber: Topcon Positioning System)

- Panjangteropong : 150mm
- Diameter lensaobjektif: 45mm
- Perbesaran : 30x
- Gambar: Tegak
- Jarak fokus minimum: 1.3 meter
- Pengukuran jarak: 3,000m
- Akurasi jarak: $\pm (2\text{mm} + 2\text{ppm}\times\text{D})$
- Pengukuransudut: 2 sisi horizontaldan 1 sisivertikal
- Akurasi sudut: 5 "
- Bacaan sudut minimal: 1" / 5"
- Display: 2 sisi

➤ Tipe display: Dot Matrix Graphic LCD

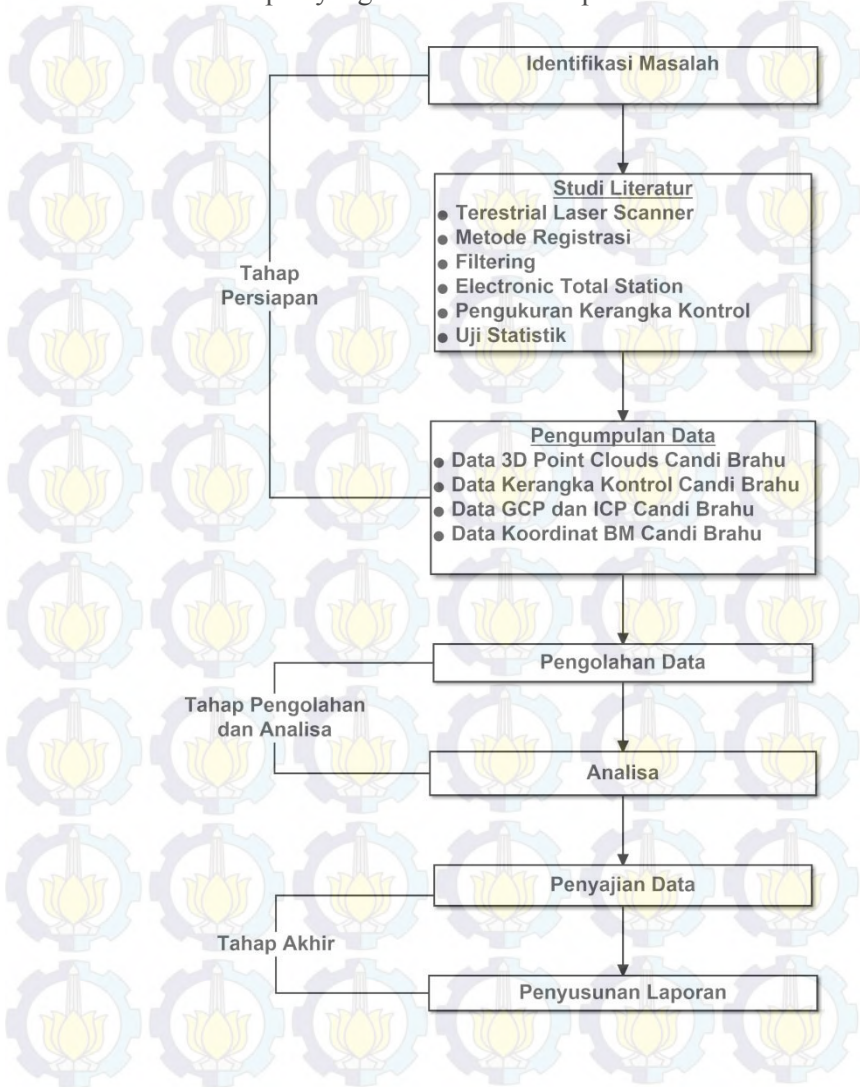
- Laptop Asus N46V sebagai alat pengolahan data

2. *Software*

- Sistem operasi Windows 8 Professional
- X-PAD Office MPS sebagai software pengolahan data *TLS*
- Autodesk ReCap 2016 untuk penyajian data *point clouds*
- Microsoft Office 2010 untuk penyajian dan pembuatan laporan hasil penelitian

3.3 Metodologi Penelitian

Tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah:



Gambar 3. 4 Diagram Alir Tahapan Penelitian

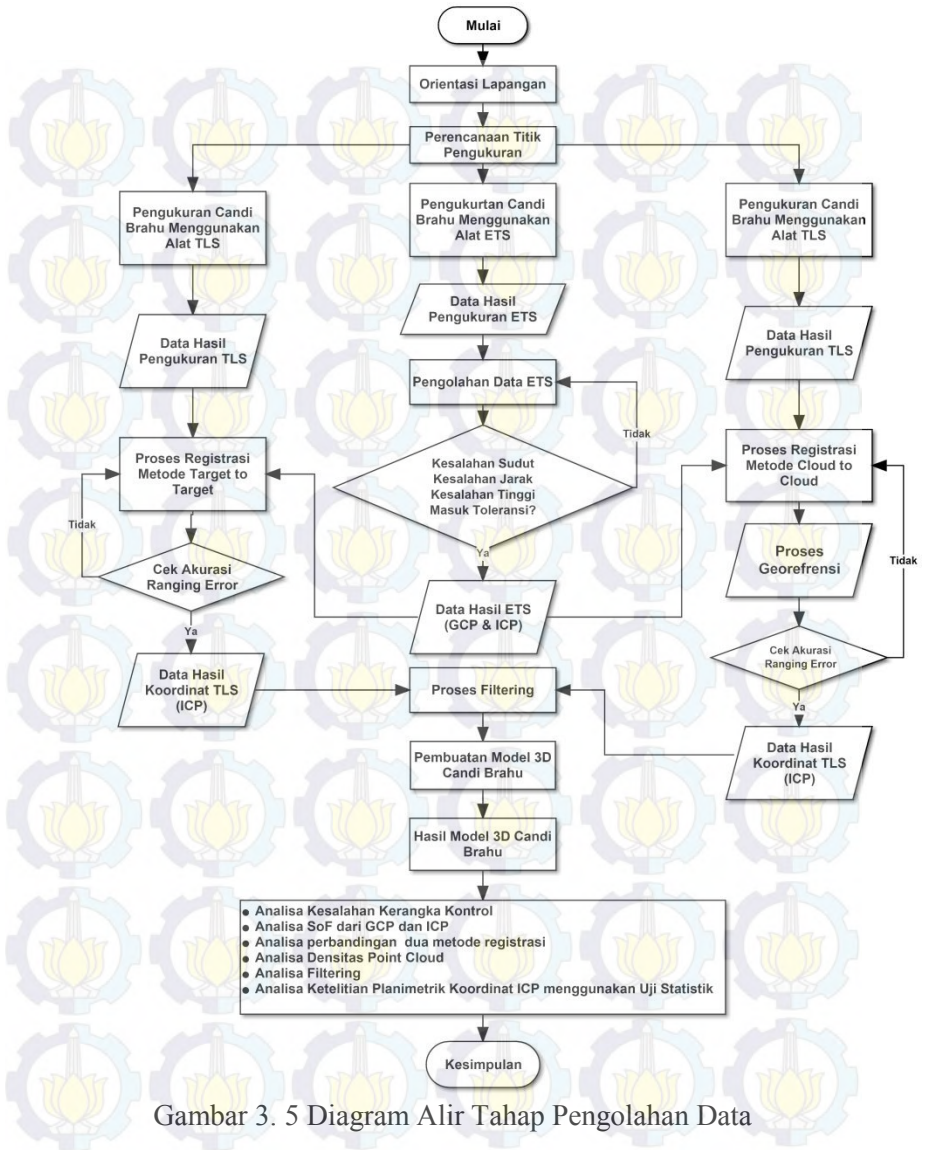
3.3.1 Tahap Persiapan

Pada tahap ini kegiatan yang telah dilakukan adalah:

1. **Identifikasi Masalah**
Identifikasi masalah dilakukan untuk menentukan dan membatasi fokus permasalahan yang akan diselesaikan dalam penelitian.
2. **Studi Literatur**
Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan pemahaman mengenai materi yang terkait dengan penelitian ini.
3. **Persiapan Peralatan dan Perizinan Lokasi**
Pada kegiatan ini dilakukan persiapan peralatan, baik *hardware* maupun *software* yang digunakan. Selain itu, Candi Brahu merupakan peninggalan bersejarah yang dijadikan objek wisata, maka untuk melakukan pengumpulan data perlu dilakukan proses perizinan melalui Badan Pelestarian Cagar Budaya (BPCB) Mojokerto.
4. **Pengumpulan Data**
Tahap ini dilakukan untuk pengambilan data lapangan yang akan digunakan dalam penelitian.

3.3.2 Tahap Pengolahan Data

Tahap pengolahan data dalam penelitian ini ditunjukkan dalam diagram berikut:



Gambar 3. 5 Diagram Alir Tahap Pengolahan Data

Adapun penjelasan dari diagram alir tersebut adalah sebagai berikut:

1. Hal pertama yang dilakukan adalah membuat kerangka kontrol yang terdiri dari 5 buah titik kontrol. Kerangka ini digunakan dalam pengukuran GCP dan ICP pada objek. Perhitungan koordinat X, Y dilakukan menggunakan sistem koordinat UTM yang bersumber dari titik ikat BM Candi Brahu, sedangkan koordinat Z menggunakan koordinat lokal. Hasil pengukuran ini berupa koordinat GCP dan ICP objek yang digunakan dalam proses *georeferencing* dan analisa hasil.
2. Pengukuran menggunakan TLS dilakukan untuk mendapatkan data *point clouds*. *Scan* dilakukan sebanyak 4 kali dengan posisi yang berbeda.
3. Data *point clouds* yang didapat melalui TLS diolah menggunakan software X-PAD Office MPS. Proses registrasi, *filtering* dan *georeferencing* dilakukan menggunakan software ini. Hasil akhir dari pengolahan data TLS adalah data *point clouds* dalam format .pts.
4. Registrasi adalah langkah pertama pengolahan yaitu transformasi semua *point clouds* dari sistem pemindai dalam koordinat lokal ke dalam sistem koordinat yang dituju. Registrasi dilakukan menggunakan dua metode yakni *Cloud to Cloud* dan *Target to Target*.
5. Setelah diperoleh data *point clouds* dari hasil registrasi *Cloud to Cloud* dan *Target to*

Target dengan sistem koordinat yang sama, koordinat ICP dari kedua data akan di analisa.

6. Hasil dua model dari kedua metode registrasi akan dibandingkan, dan menghasilkan standard deviasi dari kedua model tersebut.

3.3.3 Tahap Analisa

Salah satu analisa yang dilakukan pada tahap ini adalah uji statistik terhadap perbedaan nilai ICP dari kedua model terhadap nilai ICP yang didapat menggunakan *total station*.

3.3.4 Tahap Penyajian Data

Pada tahap ini akan dilakukan proses penyajian data. Hasil dari analisa perbandingan nilai ICP akan ditunjukkan dalam bentuk tabel. Model 3D juga akan disajikan. Tahap ini juga akan dilakukan proses penarikan kesimpulan berdasarkan analisa. Hasil dari penafsiran data dan penarikan kesimpulan akan disusun dalam bentuk laporan tertulis untuk memberikan tambahan ilmu baik secara praktis maupun secara teoritis untuk penelitian selanjutnya.

BAB IV HASIL DAN ANALISA

4.1

Hasil

4.1.1 Perhitungan Poligon

Kerangka kontrol pada penelitian ini terdiri dari 4 titik. Kerangka kontrol ini digunakan dalam pengukuran *GCP* dan *ICP* objek. Sketsa dari pengukuran poligon dapat dilihat pada gambar 4.1.



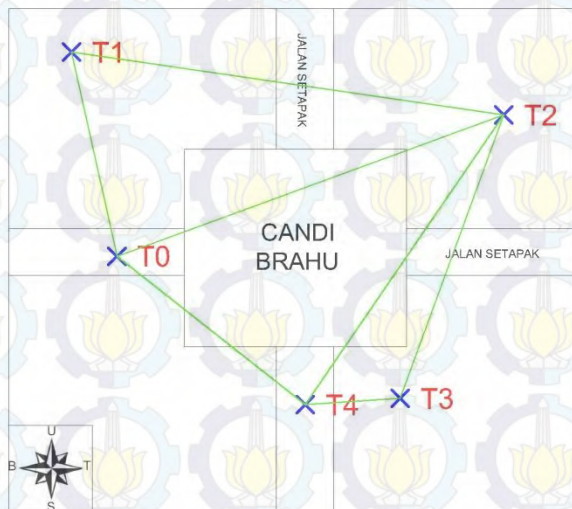
Gambar 4. 1 Sketsa pengukuran poligon

Alat yang digunakan dalam pengukuran kerangka kontrol adalah *Total Station*. Data yang diambil dalam pengukuran adalah sudut horizontal, sudut zenith, dan jarak miring, berikut adalah hasilnya:

Tabel 4. 1 Koordinat Titik Kontrol

Nama	X(m)	Y(m)	Z(m)
T0	651647	9165982	32.000
T1	651639	9166017	31.994
T2	651714	9166006	31.691
T3	651696	9165957	32.024
T4	651679	9165956	32.098

Hasil perhitungan dari kerangka kontrol ini memiliki nilai kesalahan dari penutup sudut sebesar 8 detik dan kesalahan penutup tinggi sebesar 2,223 milimeter.



Gambar 4. 2 Konfigurasi jaring pada pengukuran kerangka kontrol

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

4.1.2 Perhitungan GCP dan ICP

Sama halnya dengan pengukuran kerangka kontrol, alat yang digunakan dalam pengukuran *ground control point (GCP)* dan *independent check point (ICP)* adalah *Total Station* dan data yang diambil adalah sudut horizontal, sudut zenith, dan jarak miring. Untuk titik yang tidak bisa dijangkau prisma, sudut horizontalnya dicatat dan koordinat (X dan Y) akan didapatkan melalui pengikatan ke muka, sedangkan elevasi didapatkan melalui perhitungan tinggi bangunan.

8 buah *GCP* akan digunakan dalam proses *georeferencing*, sedangkan 10 *ICP* akan digunakan sebagai titik pembanding dalam proses uji statistik yang letaknya dapat dilihat pada gambar 4.3 sampai 4.6. Berikut adalah hasil perhitungannya:

Tabel 4. 2 Koordinat GCP

Nama	X (m)	Y(m)	Z(m)
GCP1	651669.2183	9165971.3192	34.4927
GCP2	651670.3510	9165988.8438	34.5341
GCP3	651670.4429	9165988.9232	34.4174
GCP4	651688.1023	9165988.0290	34.1460
GCP5	651688.1838	9165987.9490	34.4969
GCP6	651684.4087	9165973.1670	36.9720
GCP7	651686.9546	9165970.1362	34.4245
GCP8	651669.2628	9165971.2507	34.4486

Tabel 4. 3 Koordinat ICP

Nama	X(m)	Y(m)	Z(m)
ICP1	651672.7975	9165986.1053	36.7853
ICP2	651671.0496	9165980.2425	36.9136
ICP3	651678.6705	9165965.4473	38.0351
ICP4	651674.5141	9165980.8686	40.3362
ICP5	651674.3973	9165978.9259	40.3507
ICP6	651674.7621	9165980.7980	43.7616
ICP7	651674.6997	9165978.9480	43.7557
ICP8	651672.9676	9165986.1795	36.8946
ICP9	651685.2015	9165985.4146	37.0209
ICP10	651684.3337	9165973.0940	37.0017



Gambar 4. 3 Letak GCP dan ICP pada sisi barat Candi



Gambar 4. 4 Letak GCP dan ICP pada sisi utara Candi



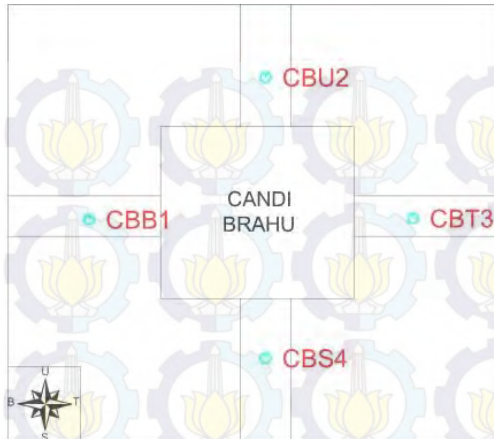
Gambar 4. 5 Letak GCP dan ICP pada sisi timur Candi



Gambar 4. 6 Letak GCP dan ICP pada sisi selatan Candi

4.1.3 Perencanaan TLS

Proses pengambilan data menggunakan *terrestrial laser scanner* dilakukan sebanyak 4 kali, yang lokasinya ditandai dengan CBB1, CBU2, CBT3, dan CBS4. Perencanaan dibuat seperti ini agar tekstur candi bisa didapat dengan baik. Sketsa tempat berdiri alat TLS dapat dilihat pada gambar 4.7.



Gambar 4. 7 Perencanaan Posisi Laser Scanner

4.1.4 Registrasi

a. Registrasi *Cloud to Cloud (CTC)*

Data empat point clouds candi digabungkan menjadi satu sistem koordinat menggunakan metode *Cloud to Cloud*. Dalam metode tersebut dibutuhkan tiga titik sekutu (*Natural Target*) pada setiap data point clouds, berikut adalah contoh pemilihan titik sekutu pada data point clouds:

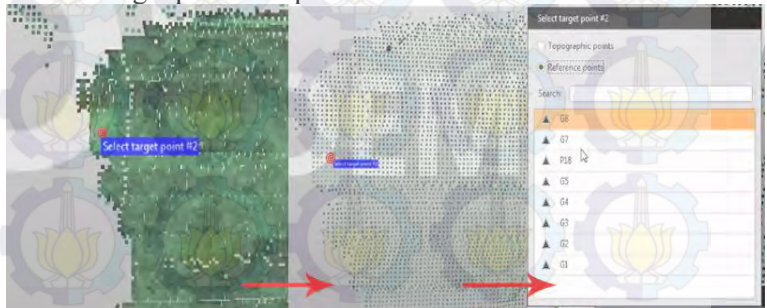


Gambar 4. 8 Pemilihan titik sekutu pada saat proses registrasi *Cloud to Cloud*

Hasil dari registrasi ini mempunyai rata – rata kesalahan sebesar 0.0083 m.

b. Registrasi Target to Target (TtT)

Data empat point clouds candi digabungkan menjadi satu sistem koordinat menggunakan metode *Target to Target*. Dalam metode tersebut menggunakan target yang telah mempunyai koordinat (*Known Target*). Titik target tersebut adalah GCP yang telah diukur menggunakan alat Total Station, berikut adalah contoh pemilihan target pada data point clouds:



Gambar 4. 9 Pemilihan target pada proses registrasi *Target to Target*

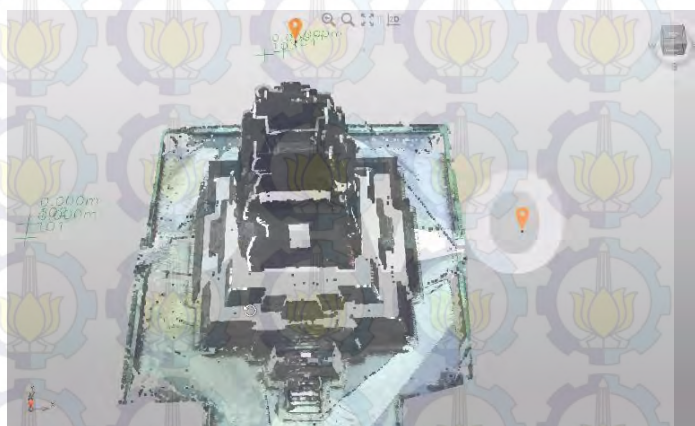
Hasil dari registrasi ini mempunyai rata-rata kesalahan sebesar 0.0014 m.

4.1.5 Filtering

Proses *filtering* bertujuan untuk membuang titik yang tidak diperlukan dari *point clouds*. Proses ini dilakukan secara manual, berikut adalah contoh sebelum dan sesudah proses *filtering*:



Gambar 4. 10 Point cloud candi brahu sebelum proses Filtering



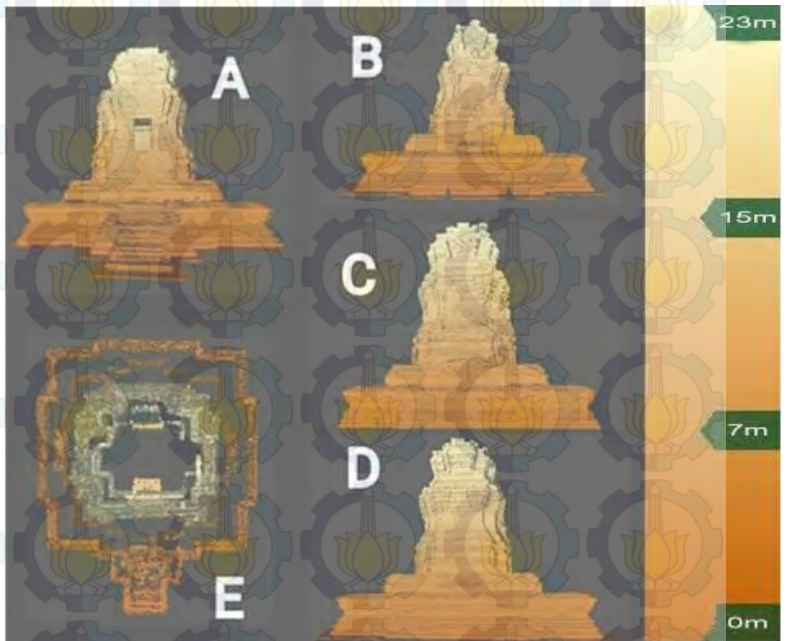
Gambar 4. 11 Point cloud candi brahu setelah proses Filtering

Jumlah point clouds dari kedua model mengalami penurunan point clouds yang hampir sama, dengan rata – rata penurunana sebesar 76%.

4.1.6 Hasil Model

a. Hasil Model *Cloud to Cloud*

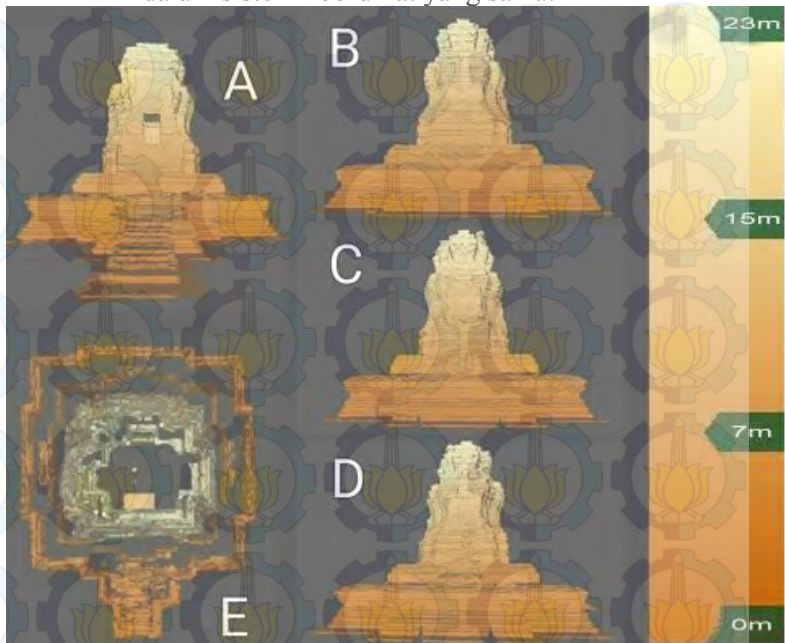
Proses registrasi yang digunakan untuk menyatukan 4 buah *point clouds* yang didapat dari pengambilan data TLS adalah *Cloud to Cloud registration*, yakni menggunakan tiga natural target (titik sekutu) pada setiap data point cloud setiap sisi candi. Berikut adalah tampilan data hasil registrasi *Cloud to Cloud* yang sudah berada dalam sistem koordinat yang sama:



Gambar 4. 12 Data TLS Candi Brahu dengan metode registrasi *Cloud to Cloud* tampak sebelah barat (A), sebelah utara (B), sebelah timur (C), sebelah selatan (D), dan tampak atas (E)

b. Hasil Model *Target to Target*

Proses registrasi yang digunakan untuk menyatukan 4 buah *point clouds* yang didapat dari pengambilan data TLS adalah *Target to Target registration*, yakni menggunakan dua target yang mempunyai koordinat (*Known Target*) pada setiap data point cloud setiap sisi candi. Berikut adalah tampilan data hasil registrasi *Target to Target* yang sudah berada dalam sistem koordinat yang sama:



Gambar 4. 13 Data TLS Candi Brahu dengan metode registrasi *Target to Target* tampak sebelah barat (A), sebelah utara (B), sebelah timur (C), sebelah selatan (D), dan tampak atas (E)

4.1.7 Georeference

Proses georeference hanya dilakukan pada model hasil registrasi *Cloud to Cloud*, dikarenakan hasil model *Cloud to Cloud* masih menggunakan koordinat lokal maka dilakukan proses georeferensi pada titik GCP di pengukuran *Terrestrial Laser Scanner* dengan acuan pada hasil pengukuran polygon menggunakan Total Station.



Gambar 4. 14 Proses Georeferencing

Proses *georeference* dilakukan untuk mengubah koordinat lokal tiap point clouds ke dalam satu sistem koordinat global (UTM). Berbeda dengan model registrasi *Cloud to Cloud*, model registrasi *Target to Target* sudah memiliki sistem koordinat global sejak proses registrasi *Target to Target* dilakukan pada model tersebut. Proses georeference pada model *Cloud to Cloud* menghasilkan rmse rata-rata sebesar 0.0092 m.

4.1.8 Koordinat ICP data CTC dan TTT

Nilai ICP diambil dari kedua *point clouds* untuk digunakan dalam analisa menggunakan uji statistik. Nilai koordinat dari tiap ICP dapat dilihat pada tabel 4.6 dan 4.7

Tabel 4. 4 Koordinat ICP TLS CTC

Nama	X (m)	Y (m)	Z (m)
ICP1	651672.792	9165986.105	36.786
ICP2	651671.042	9165980.223	36.914
ICP3	651678.670	9165965.443	38.031
ICP4	651674.525	9165980.864	40.336
ICP5	651674.393	9165978.915	40.360
ICP6	651674.752	9165980.791	43.711
ICP7	651674.691	9165978.943	43.795
ICP8	651672.917	9165986.160	36.815
ICP9	651685.291	9165985.415	37.011
ICP10	651684.353	9165973.034	37.002

Tabel 4. 5 Koordinat TLS TTT

Nama	X (m)	Y (m)	Z (m)
ICP1	651672.7975	9165986.103	36.786
ICP2	651671.0498	9165980.242	36.913
ICP3	651678.6603	9165965.427	38.036
ICP4	651674.6108	9165980.969	40.336
ICP5	651674.3822	9165978.726	40.351
ICP6	651674.7668	9165980.798	43.792
ICP7	651674.6793	9165978.948	43.755
ICP8	651672.9775	9165986.18	36.885
ICP9	651685.2066	9165985.414	37.091
ICP10	651684.3138	9165973.084	37.001

4.2 Analisa

4.2.1 Analisa Kerangka Kontrol

Kerangka kontrol hasil pengukuran di analisa terhadap 3 kriteria, yaitu kesalahan linier, kesalahan penutup sudut, dan kesalahan penutup tinggi.

Tabel 4. 6 Kesalahan Kerangka Kontrol

No.	Nama	Nilai
1	Kesalahan Linier	0.0003 m
2	Kesalahan Penutup Sudut	8"
3	Kesalah Penutup Tinggi	2 mm
4	<i>Strenght Of Figure</i>	0.857

Nilai 0.0003 di dapat dari persamaan kesalahan linier. Nilai ini lebih kecil dari standar minimal yaitu 1/2500 atau 0,0004, oleh karena itu nilai linear memasuki nilai ketelitian.

Nilai toleransi didapat dari persamaan kesalahan penutup sudut adalah 10 detik, di mana nilai ini lebih besar dari kesalahan penutup sudut milik kerangka kontrol, yaitu 8 detik. Dengan ini nilai kesalahan penutup sudut memasuki nilai ketelitian.

3.570 mm nilai maksimal dari kesalahan penutup tinggi. Kerangka kontrol memiliki nilai kesalahan penutup tinggi sebesar 2 mm sehingga kesalahan penutup tinggi memasuki nilai ketelitian.

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

4.2.2 Analisa Registrasi

a. Analisa Registrasi Berdasarkan Perencanaan dan Pengambilan Data

Dari segi pengambilan data, metode registrasi *Cloud to Cloud* adalah metode yang paling praktis. Selain sentring alat, metode registrasi *Cloud to Cloud* ini hanya memperhatikan pertampalan antara dua hasil pemindaian, dan tidak memerlukan target dilapangan.

Cukup berbeda dengan metode *Cloud to Cloud*, metode *Target to Target* memiliki tingkat kepraktisan lebih rendah dibanding dengan metode *Cloud to Cloud*. Metode *Target to Target* tersebut harus memiliki minimal dua titik target yang diketahui koordinatnya, pada setiap tempat pengambilan data TLS. Pemasangan target tersebut juga terkadang memakan waktu, melihat target cukup sulit direkatkan pada tekstur candi yang terbuat dari batu bata.

Dari segi pengolahan data dalam registrasi metode *Cloud to Cloud* adalah yang paling membutuhkan waktu dan ketelitian dalam penentuan titik sekutu. Hal tersebut terjadi karena dibutuhkan penentuan titik sekutu di setiap daerah pertampalan dari dua hasil pemindaian objek candi.

Metode *Target to Target* sangat berbeda dengan metode *Cloud to Cloud*. Metode *Target to Target* membutuhkan waktu lebih sedikit dari metode *Cloud to Cloud* karena dalam proses registrasi kita telah mengetahui posisi target pada point cloud objek candi. Secara keseluruhan dalam perbandingan metode registrasi dalam hal pengolahan data ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 4. 7 Perbandingan registrasi berdasarkan perencanaan dan pengambilan data

Hal	<i>Cloud to Cloud</i>	<i>Target to Target</i>
Jumlah Target	Tidak dibutuhkan	Minimal 2
Persiapan pemindaian	Sentring TLS	Sentring TLS dan pemasangan target
Proses pemindaian	memindai objek	Memindai objek dan target
Cara Registrasi	Natural Target	Known Target
Sistem Koordinat	Lokal	Lokal / Global

b. Perbandingan Hasil Registrasi

Dalam perbandingan hasil registrasi, metode *Target to Target* merupakan metode yang menghasilkan rmse terkecil jika dibandingkan dengan metode *Cloud to Cloud*. Hal ini disebabkan oleh metode *Target to Target* menggunakan titik target yang paling akurat dan telah memiliki koordinat.

Metode *Cloud to Cloud* mempunyai rmse lebih besar karena metode ini bergantung pada pemilihan titik sekutu yang dipakai sebagai titik pertampalan hasil scan objek candi. Secara keseluruhan rmse dari kedua registrasi ditunjukkan pada tabel berikut:

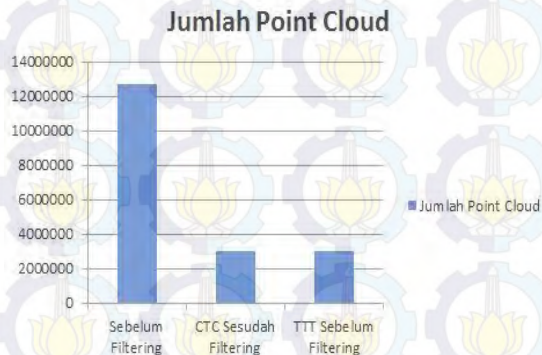
Tabel 4. 8 Rata-rata kesalahan kedua registrasi

Registrasi	RMSE (m)
<i>Cloud to Cloud</i>	0.0083
<i>Target to Target</i>	0.0014

Dari tabel 4.8 kita dapat lihat bahwa RMSE dari kedua metode registrasi memenuhi toleransi, dimana $RMSE < 2.35$ cm.

4.2.3 Analisa Filtering

Point Cloud yang dihasilkan proses registrasi berjumlah 12.683.476 titik dengan densitas sebesar 6mm. Filtering dilakukan untuk membuang titik yang tidak digunakan. Proses ini dilakukan secara manual dengan 2 parameter. Yang pertama adalah titik bukan merupakan bagian dari objek penelitian. Yang kedua adalah *noise* yang tidak seharusnya terdapat pada objek.



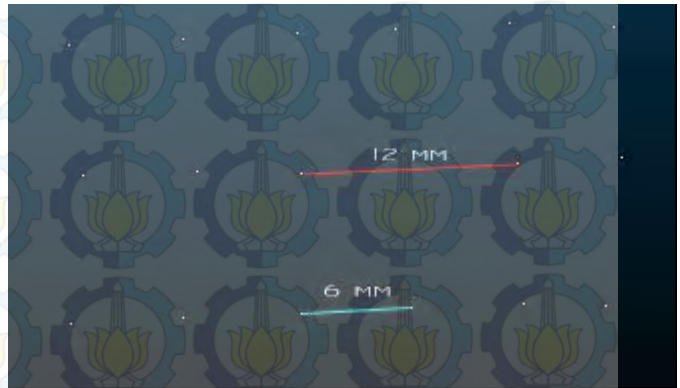
Gambar 4. 15 Grafik Jumlah Point Clouds

Dapat dilihat pada Gambar 4.16, data point clouds setelah dilakukan proses filtering dari metode registrasi *Cloud to Cloud* dan *Target to Target* tidak jauh berbeda. Data dari metode registrasi *Cloud to Cloud* memiliki noise sebesar 76.3 % dari total point clouds, dan jumlah point clouds setelah proses filtering adalah 3.005.413.

Data dari metode registrasi *Target to Target* memiliki noise sebesar 76.44 % dari total point clouds, dan jumlah point clouds setelah proses filtering adalah 2.988.521.

4.2.4 Analisa Densitas Point Clouds

Terrestrial Laser Scanner yang digunakan, GeoMax Zoom 300 memiliki spesifikasi densitas titik sebesar 6 mm.



Gambar 4. 16 Densitas titik data TLS

Seperti yang terlihat pada gambar 4.16, rata – rata jarak antar titik adalah 6 mm, seperti pada garis berwarna biru pada gambar. Tetapi ada beberapa titik yang memiliki jarak sebesar 12 mm, seperti garis berwarna merah pada gambar. Hal ini terjadi karena adanya gangguan ketika pengambilan data, seperti orang yang melintas ketika proses *scan*.

Dengan jarak rata – rata antara titik bernilai 6 mm, hal ini menandakan bahwa data yang

dihasilkan sesuai dengan spesifikasi alat yang digunakan dan memenuhi toleransi keakuratan.

4.2.5 Analisa Proses Georeference

Pada proses georeferensi dari hasil registrasi metode *Cloud to Cloud* dihasilkan RMS Error sebesar 0,0092m. Sedangkan pada metode registrasi *Target to Target* dihasilkan RMS Error 0.0014m. Oleh karena itu dapat diketahui bahwa proses georeferensi ini dapat diterima dikarenakan toleransi kesalahan TLS mode standard pada rentang jarak berdiri 10m sampai dengan 30m adalah 0.78cm sampai 2.35cm. Sehingga hasil RMSE dari proses georeferensi masih memenuhi toleransi. Pada tabel 4.9 dan tabel 4.10 menunjukkan hasil RMS Error dari masing-masing GCP.

Tabel 4. 9 Tabel error georeference hasil registrasi *Cloud to Cloud*

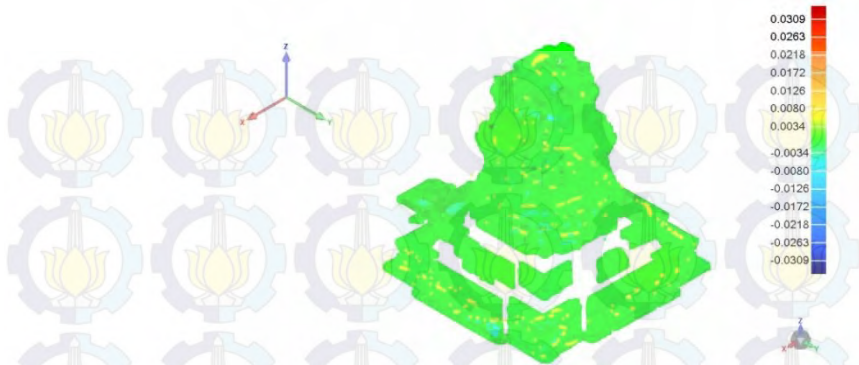
Titik	Error (m)
GCP1	0.0156
GCP2	0.0087
GCP3	0.0092
GCP4	0.0126
GCP5	0.0093
GCP6	0.0033
GCP7	0.0098
GCP8	0.0052
AVG RMSE	0.0092

Tabel 4. 10 Tabel error georeference hasil registrasi *Target to Target*

Titik	Error (m)
GCP1	0.0016
GCP2	0.0017
GCP3	0.0008
GCP4	0.0016
GCP5	0.0009
GCP6	0.0003
GCP7	0.0018
GCP8	0.0025
AVG RMSE	0.0014

4.2.6 Perbandingan Model 3D

Point cloud dari hasil registrasi tersebut dibuat mesh model. Setelah mesh model tersebut terbuat, mesh model tersebut dibandingkan. Pada perbedaan ini model dari registrasi *Target to Target* dijadikan referensi sedangkan model dari *Cloud to Cloud* yang akan di tes. Model dari *Target to Target* dijadikan referensi karena nilai *RMSE* pada saat pada saat registrasi lebih baik daripada registrasi *Cloud to Cloud*.



Gambar 4. 17 Deviasi perbandingan model *CTC* terhadap model *TTT*

Dari Gambar 4.9, terlihat bahwa deviasi jarak dua model candi didominasi warna hijau dengan persentase 86,31%. Jika dilihat pada skala warnanya, warna hijau mempunyai deviasi jarak hasil komparasi antara kedua model berada di antara $\pm 0,0034\text{m}$.



Gambar 4. 18 Grafik distribusi deviasi komparasi model 3D

Nilai standar deviasi hasil komparasi adalah 0,0036m. Berdasarkan gambar 4.18 Tersebut, hasil perbandingan menyatakan bahwa 95% dari perbandingan model tersebut berada pada rentang standar deviasi -2 sampai +2, sisanya 5% berada pada rentang standar deviasi -7 sampai -3 dan +3

sampai +7. Standar deviasi antara dua model tersebut dipengaruhi oleh besaran RMSE dari masing-masing model yang ditunjukkan pada tabel 4.9 dan 4.10. Oleh karena itu model 3D Candi Brahu data *Cloud to Cloud* dan *Target to Target* tidak signifikan perbedaannya dari segi ukurannya.

4.2.7 Analisa Ukuran Geometris Model

Untuk mengecek kualitas data ukuran pada model 3D dari kedua metode registrasi, dilakukan validitas data geometris sesuai dengan data yang dikeluarkan oleh Badan Pelestarian Cagar Budaya (BPCB) Mojokerto yang ditampilkan pada tabel 4.11.

Tabel 4. 11 Ukuran geometris candi brahu dari BPCB, CTC, dan TTT

	Panjang (m)	Lebar(m)	Tinggi(m)
BPCB	18.4	18.4	23.2
CTC	18.853	18.915	23.958
TTT	18.521	18.624	23.623
Δ BPCB-CTC	0.453	0.515	0.758
Δ BPCB-TTT	0.121	0.224	0.423

Dari tabel 4.11 dapat dilihat bahwa data ukuran geometris *TTT* lebih mendekati data yang dikeluarkan oleh BPCB, jika dibanding dengan *CTC*. Hal tersebut dipengaruhi oleh RMSE dari kedua metode registrasi.

4.2.8 Analisa Koordinat ICP

Uji statistik dilakukan terhadap nilai ICP yang dihasilkan oleh kedua metode, dengan menggunakan nilai ICP yang didapat

menggunakan *total station* sebagai pembandingnya. Uji statistik yang dilakukan adalah uji *t student*. Berdasarkan tabel distribusi *t student*, dengan menggunakan tingkat kepercayaan 90% dan derajat kebebasan sebesar 2, didapatkan nilai $t = 2,920$.

Tabel 4.12 Hasil Uji *t student* pada koordinat X

Nama	Min Interval	Max Interval	CTC	TTT
ICP1	651672.775	651672.820	651672.792	651672.798
ICP2	651671.027	651671.072	651671.042	651671.050
ICP3	651678.648	651678.693	651678.670	651678.660
ICP4	651674.492	651674.536	651674.525	651674.611
ICP5	651674.375	651674.420	651674.393	651674.382
ICP6	651674.740	651674.784	651674.752	651674.767
ICP7	651674.678	651674.722	651674.691	651674.679
ICP8	651672.945	651672.990	651672.917	651672.977
ICP9	651685.179	651685.224	651685.291	651685.207
ICP10	651684.312	651684.356	651684.353	651684.314

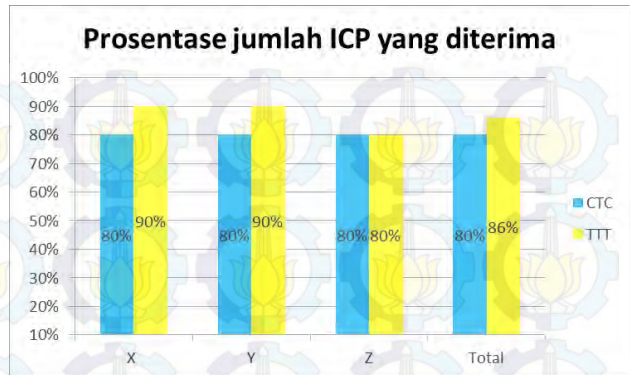
Tabel 4.13 Hasil Uji *t student* pada koordinat Y

Nama	Min Interval	Max Interval	CTC	TTT
ICP1	9165986.068	9165986.143	9165986.105	9165986.103
ICP2	9165980.205	9165980.280	9165980.293	9165980.242
ICP3	9165965.410	9165965.484	9165965.443	9165965.427
ICP4	9165980.831	9165980.906	9165980.864	9165980.869
ICP5	9165978.889	9165978.963	9165978.915	9165978.726
ICP6	9165980.761	9165980.835	9165980.791	9165980.798
ICP7	9165978.911	9165978.985	9165978.943	9165978.948
ICP8	9165986.142	9165986.217	9165986.160	9165986.180
ICP9	9165985.377	9165985.452	9165985.415	9165985.414
ICP10	9165973.057	9165973.131	9165973.034	9165973.084

Tabel 4.14 Hasil Uji t student pada koordinat Z

Nama	Min Interval	Max Interval	CTC	TTT
ICP1	36.76594581	36.80456758	36.7855670	36.7856977
ICP2	36.89427435	36.93289611	36.9138523	36.9132287
ICP3	38.01579169	38.05441346	38.0310257	38.0355732
ICP4	40.31691961	40.35554138	40.3363050	40.3364959
ICP5	40.33137192	40.36999369	40.3598281	40.3508061
ICP6	43.74228974	43.78091151	43.7110062	43.7920625
ICP7	43.73641377	43.77503554	43.7552466	43.7554657
ICP8	36.87527413	36.9138959	36.8148501	36.8845013
ICP9	37.00157869	37.04020045	37.0108957	37.0909571
ICP10	36.98235342	37.02097519	37.0016249	37.0012490

Berdasarkan tabel 4.11, 4.12 dan 4.13 di atas terlihat bahwa sebagian besar nilai koordinat ICP berada di antara interval kepercayaan. Beberapa nilai yang berada di luar interval ditandai dengan blok warna jingga (contoh: 9127745.612). Koordinat metode *Cloud to Cloud* pada sumbu X, Y, dan Z, terdapat 2, 1, dan 3 koordinat yang ditolak. Sedangkan pada metode *Target to Target* pada sumbu X, Y, dan Z, terdapat 1, 2, dan 2 yang ditolak.



Gambar 4. 19 Grafik prosentase jumlah ICP yang diterima

Secara keseluruhan, terdapat 24 titik koordinat metode *Cloud to Cloud* yang diterima atau sebesar 80%, sedangkan untuk metode *Target to Target* sebanyak 26 titik atau 86%. Hal ini menandakan kedua metode memiliki hasil yang baik, di mana kedua metode memberikan hasil di tidak kurang dari 80%. Berdasarkan hasil analisa terlihat bahwa tidak ada perbedaan yang cukup berarti/signifikan antara kedua metode ini.

BAB V

PENUTUP

5.1 **Kesimpulan**

- a. Sesuai dengan analisa model dari kedua metode registrasi, tidak ada perbedaan yang signifikan pada segi jarak dengan deviasi jarak sebesar 95% berada pada ± 2 *standar deviasi. Sedangkan RMSE kedua metode memenuhi toleransi dengan masing RMSE sebesar 0.0083m untuk *CTC*, dan 0.0014m untuk *TTT*. Oleh karena itu kedua metode dapat digunakan dalam pemodelan dan memiliki kelebihan dan kekurangan masing – masing.
- b. Berdasarkan hasil analisa uji t student, terlihat bahwa tidak ada perbedaan yang cukup berarti/signifikan antara kedua metode ini. Secara keseluruhan, terdapat 24 koordinat (8X, 8Y, 8Z) metode *Cloud to Cloud* yang diterima atau sebesar 80%, sedangkan untuk metode *Target to Target* sebanyak 26 koordinat (9X, 9Y, 8Z) atau 86%.

5.2 **Saran**

1. Untuk penelitian selanjutnya, pengambilan data menggunakan *Terrestrial Laser Scanner* sebaiknya menggunakan tingkat *overlap* yang tinggi, sehingga hasil yang lebih baik dapat diperoleh dari proses registrasi dan *georeferencing*.
2. Pemasangan tanda atau target pada objek penelitian akan sangat membantu dalam pemodelan 3D, terutama pada saat melakukan *georeferencing*.



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H. Z. (2002). *Survey Dengan GPS*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Adhitiaputra, R. (2013). Mekanisme Kalibrasi Terrestrial Laser Scanner (TLS). *Undergraduate Thesis, Bandung: Departement of Geodetic Engineering, Institut Teknologi Bandung*.
- Anjasmara, I. M. (2005). *Sistem Tinggi*. Surabaya: Pendidikan dan Pelatihan (DIKLAT) Teknis Pengukuran dan Pemetaan Kota.
- Atkinson, K. B. (1996). *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Scotland: Whittles Publishing.
- Barnes, A. (2012). Penggunaan Metode Fotogrametri Rentang Dekat dan Laser Scanning dalam Pembuatan Dense Point Cloud (Studi Kasus: Candi Cangkuang). *Undergraduate Thesis, Bandung: Departement of Geodetic Engineering, Institut Teknologi Bandung*.
- Basuki. (2006). *Ilmu Ukur Tanah*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Chow, J., Lichti, D. D., & Teskey, W. F. (2010). Self-Calibration of the Trimble (MENSI) GS200 Terrestrial Laser Scanner. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII*.
- Fraser, C. S. (1997). Digital camera self-calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 149-159.
- Ghilani, C. D., & Wolf, P. R. (2006). *Adjustment Computation: Spatial Data Analysis* (4th ed.). Hoboken: John Wiley & Sons.
- Handayani, H. H., Yuwono, & Taufik, M. (2015). Preliminary Study of Bridge Deformation Monitoring Using GPS and CRP. *Procedia Environmental Sciences*, 24, 266-276.

- Hoffmeister, D., Curdt, C., Tilly, N., & Bendig, J. (2011). 3D Terrestrial Laser Scanning for Field Corp Modelling. *Workshop on Remote Sensing Methods for Change Detection and Process Modelling*.
- Katoch, C. (2013). Close Range Photogrammetric Applications for 3-D Realistic Reconstruction of Object Using Still Images. *Undergraduate Thesis, Netherland: Faculty of Geo-information Science and Earth Observation, University of Twente*.
- Leitch, K. R. (2010). *Close Range Photogrammetric Measurement of Bridge Deformation*. New Mexico: Lambert Academic Publishers.
- Lowe, D. G. (2004). Object Recognition fom Local Scale-invariant Features. *International Journal of Computer Vision* 60, (pp. 91-110).
- Muda, I. (2008). *Teknik Survei dan Pemetaan Jilid 2* . Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- Mulia, D., & Handayani, H. H. (2014). Studi Fotogrametri Jarak Dekat dalam Pemodelan 3D dan Analisis Volume Objek. *Jurnal Geoid*, 10, 32-39.
- Nugraha, A. (2013). Pemantauan Longsoran di Kawasan Ciloto (Cianjur). *Undergraduate Thesis, Bandung: Departement of Geodetic Engineering, Institut Teknologi Bandung*.
- Prameka, A. S. (2013). Kontribusi Pajak Daerah dan Retribusi Daerah Terhadap Pendapatan Asli Daerah (PAD) Kabupaten Malang (Studi pada Dinas Pendapatan Pengelolaan Keuangan dan Aset Kabupaten Malang). *Jurnal Ilmiah Mahasiswa FEB Vol. 1, Universitas Brawijaya*.
- Putra, R. A. (2014). Pemodelan 3D Menggunakan Teknologi Terrestrial Laser Scanner (Objek Studi: Masjid Al Irsyad Kota Baru Parahyangan). *Undergraduate Thesis, Bandung: Departement of Geodetic Engineering, Institut Teknologi Bandung*.

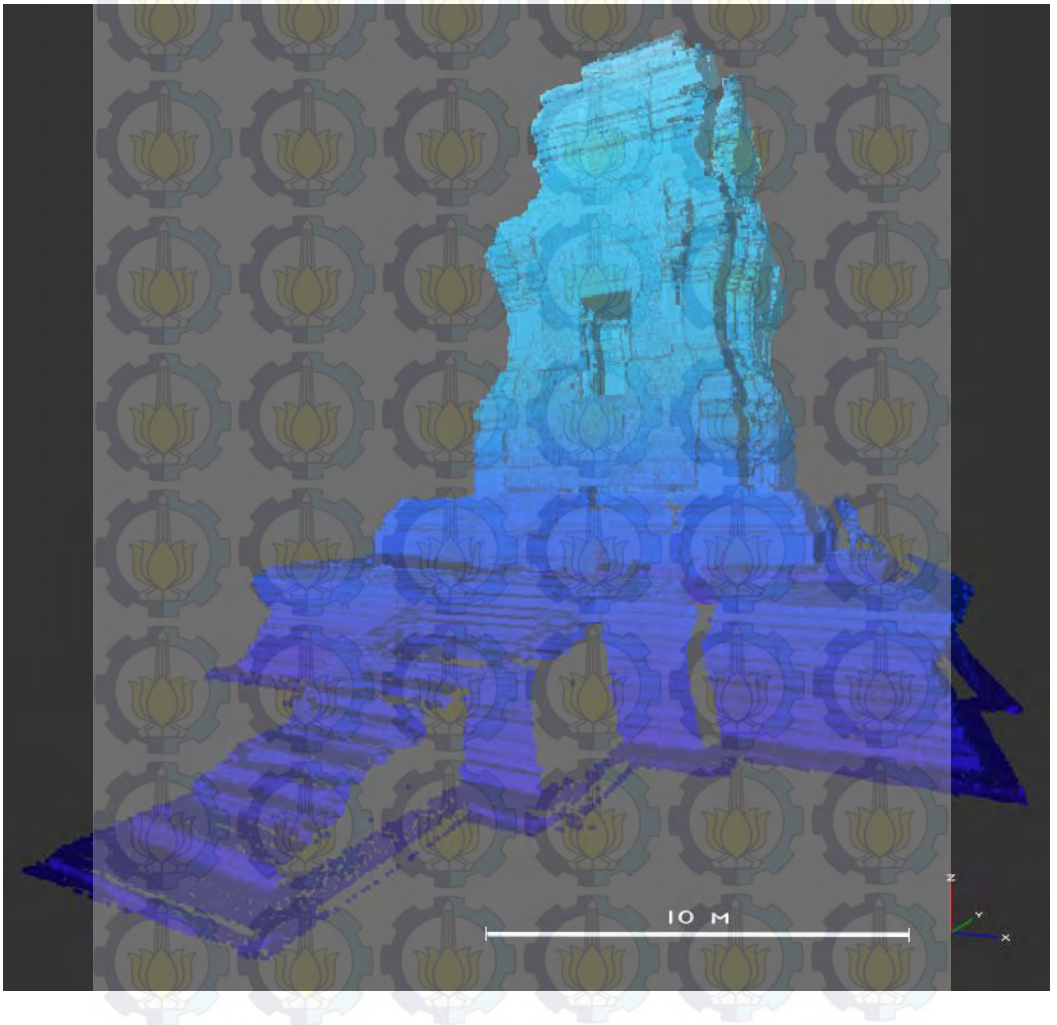
- Quintero, M. S., Genechten, B. V., Heine, E., & Garcia, J. L. (2008). *Tools for Advanced Three-dimensional Surveying in Risk Awareness Project (3DRiskMapping)*. Leonardo da Vinci Programme of the European Union.
- Reshetyuk, Y. (2009). *Self-Calibration and Direct Georeferencing in Terrestrial Laser Scanning*. Stockholm: VDM Verlag.
- Riawan, R. (2013). *Pemodelan 3D Monumen Bandung Lautan Api Dengan Menggunakan Terrestrial Laser Scanner*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Rohmawi, K. S. (1995). *Upaya Pelestarian Situs Kota Kerajaan Moajapahit di Trowulan, Mojokerto, Jawa Timur 1983-1995*. Mojokerto: Direktorat Pendidikan dan Kebudayaan.
- Sayekti, S. I., Amiuzza, C. B., & Sujudwijono, N. (2014). Geometri Fraktal pada Candi Singosari sebagai Konsep Desain Museum Purbakala Singosari. *Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Arsitektur Vol. 2, Universitas Brawijaya*.
- Schluz, T. (2007). Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy. *Dissertation, Berlin: Dipl-Ing, Technical University of Berlin*.
- Snavely, N. (2010). Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections. *Proceedings of the IEEE, 98(8), 1370-1390*.
- Suwardono. (2001). *Candi Singosari*. Malang, Jawa Timur, Indonesia.
- Thompson, M. M. (1980). *Manual of Photogrammetry Fourth Edition*. Rockville: American Society of Photogrammetry.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). Structure-from-Motion' Photogrammetry: a Low-cost, Effective Tool for Geoscience Applications. *Geomorphology, 179, 300-314*.
- Wolf, P. R. (2001). *Elementary Surveying*. New Jersey: Upper Saddle River.



Lampiran I
Model 3D Candi Brahu Metode Registrasi *Cloud to Cloud*



Lampiran II
Model 3D Candi Brahu Metode Registrasi *Target to Target*



Lampiran III Surat Ijin Pengambilan Data



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

Jalan Majapahit No. 141 – 143 Trowulan, Kabupaten Mojokerto 61362
Telepon : (0321) 495515, Faksimil : (0321) 495515
Laman : purbakala.jatim@yahoo.com

SURAT IJIN PEMANFAATAN SITUS CAGAR BUDAYA
Nomor : 0325/CB7/KM/2016

Kepala Balai Pelestarian Cagar Budaya Mojokerto Wilayah Kerja Propinsi Jawa Timur
memberi ijin kepada :

Nama Mahasiswa : Moch. Sari Salam, NRP. 3511100057
Aldino Zakaria, NRP. 3511100086

Asal : Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Jurusan Teknik Geomatika

Memanfaatkan : Candi Brahu dan Kelompok Kerja Pemugaran

Keperluan : Ijin penelitian dengan judul "Studi Pemodelan 3D Berdasarkan Proses Filterisasi 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 persyaratan sebagai berikut :

1. Dalam kegiatan penelitian tersebut sekiranya dapat menyebabkan kerusakan terhadap situs maupun benda cagar budaya terlebih dahulu dikoordinasikan dengan Balai Pelestarian Cagar Budaya Mojokerto
2. Ikut menjaga kebersihan dan kelestarian lingkungan situs dan cagar budaya.
3. Kegiatan dilaksanakan pada pag/siang hari/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 persyaratan di atas, maka akan diberi sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Demikian surat ijin ini diberikan agar dipergunakan sebagaimana mestinya

Mojokerto, 3 Februari 2016
An Kepala
Kasubbag Tata Usaha

Danang Wahyu Utomo, S.S.
NIP. 197.106.02.199903.1.001



PROFIL PENULIS



Penulis dilahirkan di Ciamis, 27 Juni 1994, merupakan anak kedua dari 4 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Trisula, SDN Pucang 3 Sidoarjo, kemudian melanjutkan ke SMPN 3 Sidoarjo dan SMA Muhammadiyah 2 Sidoarjo. Setelah lulus SMA penulis melanjutkan kuliah S-1 dengan mengikuti program SNMPTN jalur tertulis dan diterima di Teknik Geomatika – FTSP, ITS pada tahun 2012 terdaftar dengan NRP 3512 100 086. Selama kuliah di Teknik

Geomatika penulis aktif mengikuti berbagai kegiatan kampus dan kepanitiaan. Di akhir tahun 2015, penulis menjadi salah satu tim peneliti dosen Teknik Geomatika yaitu Ibu Hepi Hapsari H, S.T, M.Sc. Di akhir masa studi sarjananya penulis melakukan sebuah penelitian dengan judul **“STUDI PEMODELAN 3D MENGGUNAKAN TERRESTRIAL LASER SCANNER BERDASARKAN PROSES REGISTRASI TARGET TO TARGET DAN CLOUD TO CLOUD (Studi Kasus: Candi Brahu, Mojokerto)”**.