



TUGAS AKHIR - RM 184831

PEMBUATAN *VIRTUAL REALITY* SIG (VR-SIG)
SEBAGAI PENGEMBANGAN TEKNOLOGI
VISUALISASI SITUS BANGUNAN CAGAR BUDAYA
(STUDI KASUS CANDI SARI)

HANA WIDYATARI
NRP 033 1154 0000 082

Dosen Pembimbing
Dr. - Ing. Teguh Hariyanto, M.Sc.
Dr. Deni Suwardhi, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK GEOMATIKA
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR - RM 184831

**PEMBUATAN *VIRTUAL REALITY* SIG (VR-SIG)
SEBAGAI PENGEMBANGAN TEKNOLOGI
VISUALISASI SITUS BANGUNAN CAGAR BUDAYA
(STUDI KASUS CANDI SARI)**

HANA WIDYATARI
NRP 033 1154 0000 082

Dosen Pembimbing
Dr. - Ing. Teguh Hariyanto, M.Sc.
Dr. Deni Suwardhi, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK GEOMATIKA
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



FINAL ASSIGNMENT - RM 184831

DEVELOPING A VIRTUAL REALITY GIS (VR-GIS) OF CULTURAL HERITAGE BUILDING SITE (CASE STUDY SARI TEMPLE)

HANA WIDYATARI
NRP 033 1154 0000 082

Supervisor
Dr. - Ing. Teguh Hariyanto, M.Sc.
Dr. Deni Suwardhi, S.T., M.T.

Geomatics Engineering Department
Faculty of Civil Engineering, Planning, and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**PEMBUATAN VIRTUAL REALITY SIG (VR-SIG)
SEBAGAI PENGEMBANGAN TEKNOLOGI
VISUALISASI SITUS BANGUNAN CAGAR BUDAYA
(STUDI KASUS CANDI SARI)**

Nama Mahasiswa : Hana Widyatari
NRP : 033 1154 0000 082
Jurusan : Teknik Geomatika FTSLK – ITS
Pembimbing : Dr. – Ing. Teguh Hariyanto, M.Sc.
Dr. Deni Suwardhi, S.T., M.T.

ABSTRAK

Candi Sari merupakan salah satu bangunan cagar budaya Indonesia yang berada di Yogyakarta. Namun jika dibandingkan dengan candi lainnya, Candi Sari masih terbilang kurang dalam penyebaran informasi mengenai sejarah, arsitektur, fungsi, dan kondisi bangunan. Dalam penelitian ini dilakukan pembangunan virtual reality SIG Candi Sari sehingga masyarakat dapat mengoptimalkan pembelajaran mengenai informasi Candi Sari yang dikemas dalam visualisasi bangunan 3D serta dapat disimpan sebagai dokumentasi konservasi. Berdasarkan manfaat pembuatan VR-SIG Candi Sari sebagai dokumentasi konservasi perlu dilakukan analisis geometri pemodelan 3D agar hasil pemodelan 3D memiliki ketelitian yang tinggi untuk sarana pemeliharaan dan rekonstruksi bangunan candi, serta analisis visualisasi virtual reality SIG berdasarkan tekstur, warna, dan pencahayaan sebagai sarana visualisasi pemodelan 3D Candi Sari.

Terdapat 2 tahapan utama dalam pembuatan virtual reality SIG, yaitu pemodelan 3D Candi Sari dan pembuatan virtual reality. Pada pembuatan model 3D Candi Sari ini menggunakan hasil integrasi point cloud dari fotogrametri jarak dekat dan TLS. Sementara pada proses pembuatan virtual reality dilakukan proses penggambaran lingkungan sekitar candi, penyisipan informasi, dan pembuatan video 360°.

Hasil dari pemodelan 3D Candi Sari diketahui memiliki LoD 4 dengan RMSe untuk GCP dari sumbu X, Y, dan Z sebesar 0.011 m, 0.009 m, 0.033 m dan untuk ICP integrasi memiliki RMSe pada sumbu X, Y, dan Z sebesar 0.019 m, 0.032 m, 0.017 m. Pemodelan 3D Candi Sari menunjukkan hasil yang baik karena bernilai kurang dari 0.2 m dan memenuhi syarat LoD 4 untuk konsep visualisasi eksterior dan interior model bangunan. Untuk hasil visualisasi virtual reality SIG dari segi tekstur telah menyerupai seperti aslinya, namun aspek warna tidak memiliki warna yang sama dengan aslinya, dan aspek pencahayaan yang berbeda dengan aslinya.

Kata Kunci: *Candi Sari, Fotogrametri Jarak Dekat, Integrasi, Model 3D, TLS, Virtual Reality SIG*

DEVELOPING A VIRTUAL REALITY GIS (VR-GIS) OF CULTURAL HERITAGE BUILDING SITE (CASE STUDY SARI TEMPLE)

Name : Hana Widyatari
NRP : 033 1154 0000 082
Departement : Geomatics Engineering, FTSLK – ITS
Supervisor : Dr. – Ing. Teguh Hariyanto, M.Sc.
Dr. Deni Suwardhi, S.T., M.T.

ABSTRACT

Sari temple is one of Indonesia's cultural heritage buildings in Yogyakarta. However, compared to other temples, Sari temple is still lacking in the spread of information about the history, architecture, functions, and conditions of the building. In this research, the writer will develop a VR-GIS of Sari temple so that the society able to optimize learning about Sari temple information packaged in 3D building visualization and also can be saved as a conservation documentation. Based on the benefit of making Sari temple's 3D model as a conservation documentation need to be done analysis the geometry of 3D modeling so that the results have high accuracy in importance of maintenance and reconstruction the temple building, and analysis VR-GIS visualization based on texture, color, and lighting for importance of 3D modeling visualization of Sari temple.

There are 2 main stages in making VR-GIS, which is 3D modeling of Sari temple and virtual reality. In making 3D model Sari temple used integration point clouds from close-range photogrammetry and TLS. Meanwhile in the process of making virtual reality there are a process in the representation of the temple environment surrounding, insert information, and making video 360°.

The result of Sari temple's 3D modeling is known to have LoD 4 with RMSe for GCP from the X, Y, and Z axes by 0.011 m, 0.009 m, 0.033 m and for integration ICP RMSe from the X, Y, and Z axes by 0.019 m, 0.032 m, 0.017 m. 3D Modeling of Sari temple

shows good results because RMSe is less than 0.2 m and qualifies the LoD 4 for the exterior and interior visualization concept of the building model. For the result of the visualization of VR-GIS in terms of texture has resembles the original, but the color aspect does not have the same color as the original, and the lighting aspects are different from the original too.

Keyword: *3D Model, Close Range Photogrammetry, Integration, Sari Temple, TLS, VR-GIS*

LEMBAR PENGESAHAN

PEMBUATAN *VIRTUAL REALITY* SIG (VR-SIG) SEBAGAI PENGEMBANGAN TEKNOLOGI VISUALISASI SITUS BANGUNAN CAGAR BUDAYA (STUDI KASUS CANDI SARI)

TUGAS AKHIR

Ditujukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Program Studi S-1 Teknik Geomatika
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

HANA WIDYATARI
NRP 0331154000082

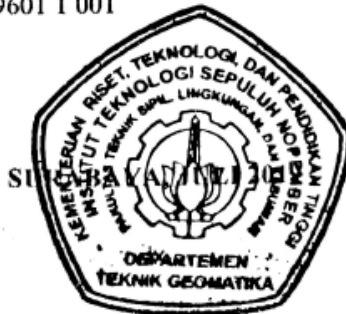
Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

Dr. – Ing. Teguh Hariyanto, M.Sc.
NIP. 19590819 198502 1 001

()

Dr. Deni Suwardhi, S.T., M.T.
NIP. 19690920 199601 1 001

()



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya sampaikan kehadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, taufiq dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian untuk tugas akhirnya yang berjudul **“Pembuatan *Virtual Reality* SIG (VR-SIG) sebagai Pengembangan Teknologi Visualisasi Situs Bangunan Cagar Budaya (Studi Kasus Candi Sari)”** dengan lancar.

Selama pelaksanaan penelitian untuk tugas akhir penulis ini, banyak pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan kepada penulis. Untuk itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Bapak Dikdik Musadiq dan Ibu Elis Rachmawati yang selalu memberikan doa dan dukungannya untuk kelancaran penelitian ini.
2. Adik kandung penulis, Naufa Salsabila yang selalu memberikan semangat, doa, dan dukungannya kepada penulis.
3. Bapak Mokhamad Nur Cahyadi, ST., M.Sc., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Geomatika ITS.
4. Bapak Dr. – Ing. Teguh Hariyanto, Msc., selaku dosen pembimbing utama penulis. Terima kasih atas kesempatan, kesabaran serta dukungan dalam bimbingan hingga dapat terselesaikannya tugas akhir ini.
5. Bapak Dr. Deni Suwardhi, ST., MT., selaku dosen pembimbing penulis. Terima kasih atas kesempatan, kesabaran serta dukungan dalam bimbingan hingga dapat terselesaikannya tugas akhir ini.
6. Bapak Husnul Hidayat ST., MT., selaku dosen konsultasi penulis. Terima kasih atas kesempatan, kesabaran serta dukungan dalam bimbingan hingga dapat terselesaikannya tugas akhir ini.
7. Balai Pelestarian Cagar Budaya D.I. Yogyakarta yang telah mengizinkan penulis untuk mengambil data informasi semantik dari Candi Sari.

8. Tim KK-INSIG yang telah mengizinkan penulis untuk mengambil data hasil pemotretan fotogrametri dan pengukuran TLS dari Candi Sari.
9. Teman-teman yang membantu dan mendukung penulis selama proses penelitian ini berlangsung Agus Prpto Sasono, Darmawan Eka Wicaksono, Fatikunada, Siti Anggraeni Santoso, dan Yaasmiin Pratita Apsari.
10. Teman-teman bimbingan Bapak Teguh yang selalu menyemangati dan mendukung akan keberhasilan penelitian ini Anida Wahyu Dewanty, Arinda Wulan Ningsih, Audina Maghfiroh, Bagus Widya Nugraha, Chomia Nilam Safitri, Citra Cahyaninggrat, Ken Risky Irdianti, Sharfina Putri, Vella Selvi, dan Wachidatin Nisa' Ul Chusnah.
11. Teman-teman Jurusan Teknik Geomatika ITS, khususnya angkatan 2015 atas dukungan dan semangat yang telah diberikan kepada penulis.

Kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan oleh penulis untuk penyempurnaan penelitian ini. Semoga laporan ini dapat bermanfaat untuk semua pihak, khususnya untuk mahasiswa Jurusan Teknik Geomatika Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, Juli 2019

DAFTAR ISI

LAMAN JUDUL.....	i
LAMAN JUDUL.....	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
LEMBAR PENGESAHAN.....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Masalah.....	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Batasan Masalah.....	4
1.4. Tujuan Penelitian	4
1.5. Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Sistem Informasi Geografis	7
2.1.1. Pengertian Sistem Informasi Geografis.....	7
2.1.2. Komponen SIG.....	7
2.1.3. Jenis Data Masukan untuk SIG	9
2.2. Pemodelan 3D	10
2.3. <i>CityGML</i>	11
2.4. <i>Level of Detail (LoD)</i>	12
2.5. <i>Virtual Reality (VR)</i>	15
2.5.1. Tingkat Imersi pada <i>Virtual Reality (VR)</i> ...	15
2.5.2. Sistem <i>Virtual Reality (VR)</i>	17
2.5.3. Faktor Penting VR	19
2.5.4. Navigasi dan Manipulasi dalam VR	20
2.6. <i>Terrestrial Laser Scanning (TLS)</i>	21
2.6.1. <i>Point Cloud</i>	23
2.6.2. Registrasi Data <i>Point Cloud</i>	24
2.6.3. Georeferensi	26
2.7. Fotogrametri Jarak Dekat	27
2.8. <i>Structure from Motion (SFM)</i>	29

2.9. Kualitas Pemodelan Objek 3 Dimensi	30
2.10. Penelitian Terdahulu	31
BAB III METODOLOGI.....	35
3.1. Lokasi Penelitian	35
3.2. Data dan Peralatan.....	36
3.2.1. Data Penelitian	36
3.2.2. Peralatan Penelitian.....	37
3.3. Metodologi Penelitian	38
3.3.1. Tahap Pelaksanaan Penelitian	38
3.3.2. Tahap Pengolahan Data.....	40
3.3.2.1. Pengolahan Eksterior Candi Sari...40	
3.3.2.2. Pengolahan Interior Candi Sari.....48	
3.3.2.3. Pengolahan Gabungan	54
3.3.2.4. Pengolahan VR-SIG	56
3.3.3. Tahap Analisis	60
3.3.4. Tahap Akhir	63
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	65
4.1. Hasil Pengolahan Fotogrametri Jarak Dekat	65
4.1.1. Hasil Eksterior Candi Sari Data Foto.....	65
4.1.1.1. GCP Eksterior Data Foto.....	65
4.1.1.2. ICP Eksterior Data Foto	69
4.1.2. Hasil Interior Candi Sari Data Foto	74
4.1.2.1. ICP Interior Data Foto	75
4.1.3. Hasil ICP Gabungan Data Foto.....	76
4.2. Hasil Pengolahan TLS.....	78
4.2.1. Georeferensi Data TLS	80
4.3. Integrasi <i>Point Cloud</i> TLS dan Fotogrametri.....	81
4.3.1. Integrasi Data Eksterior	83
4.3.2. Integrasi Data Interior	84
4.4. Hasil Pengolahan Akhir Model 3D Candi Sari	85
4.4.1. ICP Integrasi Eksterior.....	87
4.4.2. ICP Integrasi Interior	88
4.4.3. ICP Integrasi Eksterior dan Interior	89
4.4.4. Besar dan Arah Pergeseran Model 3D	90
4.5. Hasil Pengolahan Data <i>Virtual Reality</i> (VR)	92
4.5.1. Hasil Penyisipan Model 3D Candi Sari	92

4.5.2. Hasil Penggambaran Lingkungan Candi....	92
4.5.3. Hasil Penyisipan Informasi Candi.....	93
4.5.4. Hasil Pembangunan <i>Virtual Reality</i>	95
4.6. Hasil VR-SIG Candi Sari	97
4.7. Analisis Ketelitian Geometri Objek 3 Dimensi....	98
4.8. Analisis Besar dan Arah Pergeseran Model 3D.	100
4.9. Analisis Informasi Semantik Candi Sari	101
4.10. Analisis Visualisasi VR-SIG.....	102
BAB V KESIMPULAN	107
5.1. Kesimpulan	107
5.2. Saran	108
DAFTAR PUSTAKA	109
Lampiran 1	115
Lampiran 2	117
Lampiran 3	118
Lampiran 4	119
Lampiran 5	130
Lampiran 6	138
Lampiran 7	144
Lampiran 8	151

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Komponen Sistem Informasi Geografis	9
Gambar 2.2. <i>Level of Detail</i> Tingkat 0 hingga 4	14
Gambar 2.3. Kontinum <i>Virtual Reality</i>	15
Gambar 2.4. Komponen <i>Virtual Reality</i> (VR).....	17
Gambar 2.5. Desain Internal dan Eksternal dari Sistem VR	19
Gambar 2.6. Geometri Akuisisi Data TLS	21
Gambar 2.7. Prinsip Kerja Phase Based pada TLS	22
Gambar 2.8. <i>Point Cloud</i>	24
Gambar 2.9. Registrasi Data Dengan Metode <i>Target Based</i>	25
Gambar 2.10. Registrasi <i>Cloud to Cloud</i>	25
Gambar 2.11. Regitراسي Poligon atau <i>Traverse</i>	26
Gambar 2.13. Prinsip kondisi kolinearitas	28
Gambar 3.1. a. Peta Lokasi Penelitian; b. Foto Candi Sari; c. Peta Kawasan Candi Sari	35
Gambar 3.2. Diagram Alir Pelaksanaan Penelitian	38
Gambar 3.3. Pembagian Tahapan Pengolahan Data	40
Gambar 3.4. Diagram Alir Pengolahan Eksterior Candi Sari.....	40
Gambar 3.5. Diagram Alir Pengolahan Interior Candi Sari	49
Gambar 3.6. Diagram Alir Pengolahan Gabungan.....	55
Gambar 3.7. Diagram Alir Pengolahan VR-SIG Candi Sari.....	56
Gambar 3.8. Diagram Alir Tahapan Analisis Penelitian	61
Gambar 4.1. Model 3D Eksterior Candi Sari Data Foto	65
Gambar 4.2. a. Sebaran GCP Tampak Atas; b. Sebaran GCP Tampak Selatan; c. Sebaran GCP Tampak Utara; d. Sebaran GCP Tampak Timur; e. Sebaran GCP Tampak Barat.....	68
Gambar 4.3. a. Sebaran ICP Eksterior Tampak Atas; b. Sebaran ICP Eksterior Tampak Barat; c. Sebaran ICP Eksterior Tampak Utara; d. Sebaran ICP Eksterior Tampak Timur; e. Sebaran ICP Tampak Selatan	72
Gambar 4.4. Sebaran ICP Interior Candi Sari	75
Gambar 4.5. Georeferensi <i>Point Cloud</i> TLS	78
Gambar 4.6. Model 3D TLS Tergeoreferensi	79
Gambar 4.7. Hasil Segmentasi <i>Point Cloud</i> Eksterior	79
Gambar 4.8. Hasil Segmentasi <i>Point Cloud</i> Interior	80

Gambar 4.9. Lokasi Penempatan Bola Candi Sari	80
Gambar 4.10. Hasil <i>Point Cloud</i> Integrasi Eksterior.....	82
Gambar 4.11. Hasil <i>Point Cloud</i> Integrasi Interior	82
Gambar 4.12. Hasil Integrasi RMSe Eksterior	84
Gambar 4.13. Hasil Integrasi RMSe Interior.....	85
Gambar 4.14. Model Mesh 3D Candi Sari Eksterior	86
Gambar 4.15. Model Mesh 3D Candi Sari Interior	86
Gambar 4.16. Model 3D Bertekstur Bagian Eksterior	86
Gambar 4.17. Model 3D Bertekstur Bagian Interior	87
Gambar 4.18. Arah Resultan Pergeseran GCP Model 3D.....	90
Gambar 4.19. Arah Resultan Pergeseran ICP Model 3D	91
Gambar 4.20. Hasil Penyisipan Model 3D Candi Sari.....	92
Gambar 4.21. Penggambaran Lingkungan Tampak Atas.....	93
Gambar 4.22. Penggambaran Lingkungan Tampak Depan.....	93
Gambar 4.23. Penyisipan Informasi Semantik	94
Gambar 4.24. Penyisipan Informasi Historikal	94
Gambar 4.25. Penyisipan Informasi Fungsi Bangunan	94
Gambar 4.26. Penyisipan Informasi Kondisi Bangunan	95
Gambar 4.27. Penyisipan Informasi Arsitektural	95
Gambar 4.28. Pengolahan Video Virtual Reality Model 3D.....	96
Gambar 4.29. Hasil <i>Rendering</i> Video VR-SIG Eksterior	96
Gambar 4.30. Hasil <i>Rendering</i> Video VR-SIG Interior	97
Gambar 4.31. Hasil Video 360° VR-SIG	97

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Persyaratan Akurasi LoD <i>CityGML</i>	14
Tabel 4.1. Daftar Koordinat Titik GCP Foto.....	68
Tabel 4.2. Hasil RMSe GCP Foto	69
Tabel 4.3. Daftar Koordinat Titik ICP Eksterior Foto.....	72
Tabel 4.4. Hasil RMSe ICP Eksterior Foto	73
Tabel 4.5. Daftar Koordinat ICP Interior Foto	75
Tabel 4.6. Hasil RMSe Koordinat ICP Interior Foto.....	76
Tabel 4.7. Hasil RMSe Koordinat ICP Gabungan Foto	76
Tabel 4.8. Daftar Koordinat Titik Kontrol Bola TLS.....	81
Tabel 4.9. Hasil RMSe Georeferensi Pengolahan TLS	81
Tabel 4.10. Daftar Koordinat Titik Kontrol Integrasi Eksterior..	83
Tabel 4.11. Daftar Koordinat Titik Kontrol Integrasi Interior	84
Tabel 4.12. Hasil RMSe ICP Integrasi Model 3D Eksterior	87
Tabel 4.13. Hasil RMSe ICP Integrasi Model 3D Interior	88
Tabel 4.14. Hasil RMSe ICP Integrasi Model 3D Gabungan	89
Tabel 4.15. Perbandingan Visualisasi VR-SIG Eksterior.....	102
Tabel 4.16. Perbandingan Visualisasi VR-SIG Interior	104

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Indonesia adalah negara besar yang memiliki sejarah panjang dalam perkembangannya. Sejumlah kota di Indonesia memiliki koleksi seni, budaya, dan pengetahuan. Salah satunya adalah Daerah Istimewa Yogyakarta yang memiliki berbagai macam bangunan warisan bersejarah candi dan salah satunya adalah Candi Sari. Candi Sari diperkirakan dibangun pada abad ke 8 Masehi, yaitu pada masa Pemerintahan Rakai Panangkaran bersamaan dengan masa pembangunannya Candi Kalasan. Kedua candi tersebut memang memiliki banyak kemiripan, baik dari segi arsitektur maupun reliefnya. Keterkaitan kedua candi ini diterangkan dalam Prasasti Kalasan pada tahun 778 Masehi. Dalam Prasasti Kalasan diterangkan bahwa para penasehat keagamaan Wangsa Syailendra telah menyarankan agar Maharaja Tejapurnama Panangkarana, yang diperkirakan adalah Rakai Panangkaran, mendirikan bangunan suci untuk memuja Dewi Tara dan sebuah biara untuk para pendeta Buddha. Untuk pemujaan Dewi Tara dibangunlah Candi Kalasan, sedangkan untuk asrama pendeta Buddha dibangunlah Candi Sari (Perpusnas, 2014).

Candi Sari merupakan candi yang memiliki keunikan dari segi arsitekturnya. Desain Candi Sari sengaja dibuat bertingkat dan berdenah persegi panjang dengan adanya dinding menonjol yang melintang mengelilingi bagian tengah candi. Sedangkan untuk bagian luarnya terdapat cekungan atau relung-relung yang menempel di bangunan candi. Pada bagian luar tubuh candi terpahat arca-arca yang diletakkan berjajar menjadi dua baris diantara dua jendela (BPCB, 2013).

Pada awal abad ke 20 Candi Sari ditemukan dalam keadaan yang rusak berat sehingga dilakukan pemugaran yang dilaksanakan pada tahun 1929 hingga 1930 oleh A.J. Bernet Kempers seorang ahli arkeolog dari Belanda. Namun hasil dari pemugaran ini kurang memuaskan, dalam arti pemugaran tersebut belum berhasil

mengembalikan keutuhan bangunan aslinya. Hal ini disebabkan oleh banyaknya bagian candi yang hilang. Selain itu, ketika pertama kali ditemukan, terdapat bagian-bagian bangunan yang sudah rusak termakan usia, terutama yang bukan terbuat dari batu (Perpusnas, 2014).

Mengunjungi dan mempelajari berbagai situs sejarah khususnya situs sejarah Candi sangat penting bagi pelestarian situs sejarah di Indonesia. Candi sebagai salah satu unsur Cagar Budaya dalam kategori Bangunan Cagar Budaya (UU Nomor 11 Tahun 2010 Tentang Cagar Budaya Pasal 1 Ayat 1) merupakan suatu wujud dokumen yang memiliki peran penting terkait perjalanan bangsa Indonesia. Selain sebagai dokumen perjalanan bangsa Indonesia, cagar budaya juga berperan sebagai pembangunan nilai dalam pendidikan nilai-nilai sejarah. Namun kenyataannya, situs bangunan bersejarah belum mengoptimalkan visualisasi interaksi antara masyarakat dengan pembelajaran nilai-nilai sejarah sehingga masyarakat tidak dapat mempelajari dengan materi yang disampaikan. Fenomena ini mendorong pengembangan teknologi dalam visualisasi bangunan bersejarah di Indonesia (Alrianingrum, 2010).

Perkembangan teknologi memungkinkan sebuah interaksi baru antara manusia dengan sebuah objek. *Virtual reality* sebagai produk teknologi memungkinkan pengguna berinteraksi dengan suatu lingkungan yang disimulasikan oleh komputer, suatu lingkungan nyata yang ditiru atau suatu lingkungan yang disusun berdasarkan imajinasi. *Virtual reality* dapat disebut sebagai multimedia imersif atau teknologi berbasis realitas. *Virtual reality* dapat menciptakan pengalaman indrawi, yang mencakup penglihatan, sentuhan, pendengaran, dan bau secara fiktif (Hu, 2016).

Berdasarkan pada permasalahan yang dihadapi tersebut maka dalam penelitian ini akan dilakukan pembuatan *virtual reality* SIG (VR-SIG) Candi Sari sebagai pengembangan teknologi dalam visualisasi dari situs bangunan cagar budaya di Indonesia. Pada proses pembuatan VR-SIG Candi Sari dilakukan metode

akuisisi data dari fotogrametri jarak dekat dan pengukuran menggunakan *Terrestrial Laser Scanner* (TLS). Penggunaan akuisisi dengan metode fotogrametri jarak dekat memiliki beberapa kelebihan selain dikarenakan dapat mengefisiensi waktu dan nilai ekonomi pengukuran, hasil dari fotogrametri dapat disimpan dalam format digital sehingga dapat dipakai jika sewaktu-waktu dibutuhkan serta pengulangan pemotretan dan penambahan selalu dapat dilakukan dan dioptimalkan sesuai dengan permintaan pengguna (Trieb dan Kilpatrick, 2004). Melalui perkembangan yang pesat di bidang penglihatan komputer, fotogrametri semakin lama semakin marak digunakan karena kemampuannya untuk menghasilkan produk 3D yang teliti (Suwardhi dan Murtiyoso, 2017). Kemudian untuk penggunaan metode *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) dilakukan karena kemampuannya dalam akuisisi data *point cloud* yang relatif instan dan mampu mendeteksi keragaman dalam sifat, ukuran, dan kompleksitas suatu objek dengan penggambaran model 3D secara akurat dalam geometri setiap objek (Dimodifikasi dari Rachmawan, 2016). Dari dua metode akuisisi ini dilakukan proses integrasi data *point cloud* sehingga menjadi *point cloud* gabungan yang memiliki tingkat kualitas geometrik yang semakin teliti.

Kemudian data integrasi tersebut diolah sehingga menjadi *virtual reality* SIG (VR-SIG) yang terintegrasi dengan *ponsel* dan *VR-BOX*. Diharapkan penelitian ini dapat berperan sebagai dokumentasi konservasi, kepentingan pemeliharaan, dan rekonstruksi bagi kepentingan arkeologi. Selain itu, penelitian ini dapat menjadi referensi dalam pengembangan aplikatif dari teknologi SIG, fotogrametri jarak dekat, TLS, dan *virtual reality* (VR).

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana cara membuat 3D model *virtual reality* SIG (VR-SIG) Candi Sari dengan menggunakan integrasi data dari metode fotogrametri jarak dekat dan TLS?

2. Bagaimana hasil ketelitian geometrik model 3D Candi Sari berdasarkan CityGML serta besar dan arah pergeseran titik pada model 3D?
3. Bagaimana hasil analisis visualisasi berdasarkan tekstur, warna, dan pencahayaan serta informasi semantik pada *virtual reality* SIG (VR-SIG)?
4. Bagaimana cara menyajikan VR-SIG sehingga dapat digunakan oleh masyarakat?

1.3. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini, yaitu:

1. Lokasi yang digunakan pada tugas akhir ini berada di Candi Sari, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta.
2. Ukuran Candi Sari yang dimodelkan sebesar 17,30 x 10 m dan luas halaman Candi Sari sebesar 1938,57 m².
3. Metode akuisisi data dalam mendapatkan 3D model Candi Sari dengan menggunakan fotogrametri jarak dekat dan TLS.
4. Informasi yang terdapat dalam *virtual reality* SIG (VR-SIG) berupa informasi semantik mengenai historikal, arsitektural, fungsi, dan kondisi bangunan Candi Sari.
5. Luaran yang dihasilkan berupa *virtual reality* SIG (VR-SIG) dengan video 360° yang terintegrasi dengan ponsel dan *VR-BOX*.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan yang akan dicapai dalam penelitian tugas akhir ini antara lain, yaitu:

1. Membuat 3D model *virtual reality* SIG (VR-SIG) dari Candi Sari dengan menggunakan integrasi data dari metode fotogrametri jarak dekat dan TLS.
2. Menganalisis ketelitian geometri berdasarkan ketentuan *CityGML* serta besar dan arah pergeseran titik model 3D Candi Sari.

3. Menganalisis visualisasi berdasarkan tekstur, warna, dan pencahayaan serta informasi semantik pada *virtual reality* SIG (VR-SIG).

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Menjadi media pemasaran yang menarik bagi kawasan pariwisata Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta.
2. Sebagai dokumentasi konservasi, pemeliharaan, dan rekonstruksi bagi kepentingan arkeologi.
3. Memberikan informasi mengenai historikal, arsitektural, fungsi, dan kondisi bangunan sebagai pembelajaran nilai-nilai sejarah bagi masyarakat.
4. Sebagai pengembangan teknologi dalam visualisasi dari situs bangunan bersejarah di Indonesia.
5. Menjadi referensi dalam pengembangan aplikatif dari teknologi SIG, Fotogrametri jarak dekat, TLS, dan *virtual reality* (VR).

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Informasi Geografis

2.1.1. Pengertian Sistem Informasi Geografis

Sistem Informasi Geografis merupakan sistem informasi khusus yang mengelola data yang memiliki informasi spasial (bereferensi keruangan atau bergeoreferensi). Atau dalam arti yang lebih sempit adalah sistem komputer yang memiliki kemampuan untuk membangun, menyimpan, mengelola, dan menampilkan informasi bereferensi geografis, misalnya data yang diidentifikasi menurut lokasinya, dalam sebuah basis data. Para praktisi juga memasukkan orang yang membangun dan mengoperasikannya dan data sebagai bagian dari sistem ini (Sukojo dkk, 2015).

Sistem Informasi Geografis (SIG) sekarang menggabungkan peta (dalam bentuk digital) dengan semua data dari semua lembaga yang relevan. Sebagai contoh, daripada harus memiliki peta kadaster di sini dan buku tanah di sana, peta persil dan data kepemilikan digabungkan dalam satu sistem. Atau, daripada menggunakan rencana penggunaan lahan pada selebar kertas besar dan mencari secara terpisah untuk data demografis untuk mencari lokasi terbaik untuk sebuah sekolah baru, penyelidikan dapat dikirim ke komputer yang secara langsung menghasilkan peta yang menunjukkan lokasi yang sempurna (Sukojo dkk, 2015).

2.1.2. Komponen SIG

Komponen SIG dapat dibagi menjadi berikut (Heywood dkk, 2011):

1. Sistem Komputer

SIG berjalan pada semua sistem komputer mulai dari komputer personal sampai *multi - user*

super komputer. SIG juga terprogram pada banyak perangkat lunak. Terdapat beberapa komponen yang dapat membuat operasi SIG berjalan lebih efektif:

- a. Adanya *processor* dengan kemampuan tinggi untuk menjalankan perangkat lunak.
- b. Perangkat lunak SIG, yaitu perangkat lunak yang digunakan untuk membuat aplikasi khusus mengenai geografi seperti penentuan lintang dan bujur, lokasi, dan lainnya. Biasanya digunakan untuk melakukan proses menyimpan, menganalisis, memvisualkan data baik data spasial maupun non-spasial.
- c. Adanya memori yang cukup untuk menyimpan data dalam jumlah yang besar.
- d. Adanya layar beresolusi tinggi.
- e. Adanya peralatan untuk masuk dan keluarnya data (*scanners, keyboard, printer*).

2. Data Spasial

Data spasial digolongkan berdasarkan informasi mengenai posisi (garis lintang dan garis bujur), koneksi antara fitur (jalan raya, jalan kecil), dan rincian dari data non-spasial (kecepatan angin, petunjuk arah).

3. Manajemen Data dan Prosedur Analisis

Fungsi dari SIG harus memungkinkan untuk memasukkan data, penyimpanan data, pengaturan data, pengubah data, analisis data, dan pengeluaran data. Memasukkan data adalah proses mengubah data dari satu bentuk ke bentuk lain yang dapat digunakan oleh SIG agar data

dapat dibaca oleh komputer dan dapat ditulis ke dalam basis data SIG. Pada tahap ini data harus diperiksa kebenarannya.

4. Manusia dan SIG

Komponen kunci dalam SIG adalah manusia. SIG akan berjalan dengan baik apabila terdapat orang yang dapat merencanakan, membuat dan mengoperasikan sistem dengan baik. Orang yang bekerja di bidang SIG memiliki kemampuan yang beragam, tergantung pada bagian masing-masing. Mereka juga dituntut harus mengetahui pengetahuan umum yang dibutuhkan untuk bekerja dengan data geografis. Komponen Sistem Informasi Geografis dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Komponen Sistem Informasi Geografis (Louisiana Geographic Information System Council, 2018)

2.1.3. Jenis Data Masukan untuk SIG

Menurut Prahasta (2000), jenis data yang ada di dalam SIG dikelompokkan menjadi dua jenis data, yaitu:

1. Data Non-Spasial

Merupakan data yang tidak ber-*georeference* yang berhubungan dengan tema atau topik tertentu, seperti tanah, geologi, geomorfologi, penggunaan lahan, populasi, dan transportasi.

2. Data Spasial

Merupakan jenis data yang ber-*georeference* merepresentasikan aspek-aspek keruangan (titik koordinat) dari fenomena atau keadaan yang terdapat di dunia nyata. Penyajian data spasial mempunyai tiga cara dasar :

- a. Bentuk titik, merupakan sebagian koordinat tunggal (x,y) yang digunakan untuk menggambarkan berbagai penampakan geografi dan merupakan jenis data yang paling sederhana dan merupakan gambaran tempat yang memiliki ukuran tertentu serta mempunyai ruang gerak tertentu.
- b. Bentuk garis, merupakan sebgaiian rangkaian koordinat (sekumpulan titik) yang tersambung dalam suatu rantai untuk menggambarkan bentuk dan jarak suatu penampakan dan prasarana berupa jalur yang menghubungkan titik-titik di permukaan bumi.
- c. Bentuk area (*polygon*) adalah suatu area tertutup yang disusun oleh garis atau lebih biasanya poligon diberi label atau tanda khusus (arsir, warna, dsb) untuk membedakan dan membatasi antara satu poligon dengan poligon lainnya.

2.2. Pemodelan 3D

Pemodelan 3D dari suatu objek dapat di lihat sebagai proses lengkap yang dimulai dari mendapatkan data dan berakhir dengan sebuah model 3D yang interaktif dalam sebuah komputer. Kadang pemodelan 3D hanya diartikan sebagai proses konversi sebuah ukuran yang terbayang-bayang menjadi jaring-jaring yang berbentuk segitiga (*mesh*) atau permukaan yang memiliki tekstur, walaupun hal tersebut harus menggambarkan proses yang

kompleks dari rekonstruksi sebuah objek. Pemodelan 3D dibutuhkan di banyak bidang seperti navigasi, identifikasi suatu objek, visualisasi, dan animasi. Membuat sebuah model 3D yang lengkap, detail, akurat dan realistis dari sebuah gambar masih merupakan hal yang sulit, terutama untuk model yang besar dan kompleks. Secara umum pemodelan 3D terdiri dari beberapa proses, antara lain desain, pengukuran secara 3D, kerangka dan pemodelan, pemberian tekstur dan visualisasi (Remondino, 2011).

2.3. CityGML

Ketentuan *CityGML* merupakan standar yang dikembangkan oleh anggota kelompok minat khusus 3D (SIG 3D) dari inisiatif *Geodata Infrastructure North - Rhine Westfalen* (GDI NRW) di Jerman. Namun, saat ini standar *CityGML* dikembangkan dan dipelihara oleh *Open geospasial Consortium* (OGC) (Amirebrahimi dkk, 2016).

Ketentuan *CityGML* mendefinisikan cara untuk menggambarkan geometri dan atribut dari sebagian besar fitur dan objek 3D umum yang ditemukan di kota, seperti bangunan, jalan, sungai, jembatan, vegetasi dan utilitas kota lainnya. Model 3D ini dapat dilengkapi dengan tekstur dan/atau warna untuk memberikan kesan yang lebih baik dari penampilan mereka. Hubungan khusus antara objek yang berbeda juga dapat disimpan menggunakan *CityGML*, misalnya sebuah bangunan dibagi menjadi tiga bagian atau bangunan yang memiliki sebuah *carport* dan balkon. *CityGML* mendefinisikan berbagai tingkat standar detail (LOD) untuk 3D Objek. Tingkatan standar detail model 3D menyediakan kemungkinan untuk mewakili objek dengan aplikasi dan tujuan yang berbeda (Amirebrahimi dkk, 2016).

Jenis objek yang disimpan di *CityGML* dikelompokkan ke dalam modul yang berbeda. Berikut ini adalah pengelompokan objek dalam *CityGML* (Biljecki, 2018):

1. Penampilan: tekstur dan bahan untuk jenis lain.
2. Jembatan: struktur terkait jembatan.

3. Bangunan: eksterior dan interior bangunan dengan masing-masing permukaan yang mewakili pintu, jendela, dan lain-lain.
4. Utilitas Kota: bangku, lampu lalu lintas, tanda, dan lain-lain.
5. Kelompok Objek: kelompok objek jenis lain
6. General: jenis lain yang tidak dicakup secara eksplisit
7. Penggunaan Lahan: daerah yang mencerminkan penggunaan lahan yang berbeda, seperti perkotaan, pertanian, dan lain-lain.
8. Relief: bentuk dari relief bumi.
9. Transportasi: jalan, kereta api, dan lapangan.
10. Terowongan: terowongan, mungkin dibagi menjadi beberapa bagian
11. Vegetasi: daerah dengan vegetasi atau pohon individu
12. Badan Air: danau, sungai, kanal, dan lain - lain.

2.4. Level of Detail (LoD)

Penilaian hasil model 3 dimensi suatu objek dapat dinilai dari ukuran dan segi bentuknya. Untuk ukuran, pengujian dilakukan dengan uji statistik. Sedangkan dari segi bentuk, ditentukan dengan kategori pada *Level of Detail* (LOD). Menurut Biljecki (2013), dalam geomatika dan kartografi, skala peta sangat umum diterapkan, dan memberikan gambaran yang baik tentang skala yakni skala peta adalah rasio jarak di atas kertas dengan jarak dari obyek dunia nyata yang dipetakan. Istilah "skala kecil" digunakan untuk kasus-kasus di mana sejumlah kecil dari kertas diperlukan untuk mewakili suatu wilayah. Skala besar membutuhkan lembar kertas yang lebih besar.

Konsep *Level of Detail* terkait erat dengan konsep skala peta tersebut, dan LoD dipelopori oleh Clark (1976) yang menyebutkan bahwa struktur data hierarki jika dimana seseorang akan mendeskripsikan sebuah objek secara rinci maka ia akan menyusuri objek tersebut lebih dalam. Deskripsi sebuah objek yang kurang rinci dikarenakan adanya material yang

mendefinisikan sebuah objek secara lebih luas. Maka semakin rinci deskripsi sebuah objek, mengandung semakin banyak material atau geometri didalamnya. Berikut merupakan 5 tingkatan *level of detail* menurut Clark (1976).

1. LoD 0

Untuk setiap bangunan atau gedung bagian tapak atau atap garis diwakili oleh poligon horisontal dengan tinggi mutlak dan konstan yang didefinisikan dengan baik.

2. LoD 1

Untuk setiap bangunan atau bangunan bagian kulit luar yang umum diwakili oleh tepat satu prismatic ekstrusi padat.

3. LoD 2

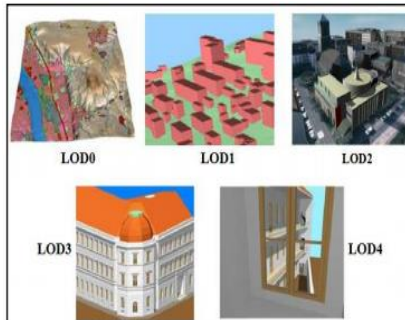
Untuk setiap bangunan atau bagian bangunan terluar geometris sederhana diwakili oleh permukaan luar horizontal atau vertikal dan bentuk atap disederhanakan. Semua jenis permukaan dan elemen bangunan tambahan dapat direpresentasikan sebagai objek semantik.

4. LoD 3

Untuk setiap bangunan atau gedung bagian kulit terluar geometris rinci diwakili oleh permukaan luar rinci dan bentuk atap rinci. Semua jenis permukaan dan elemen bangunan tambahan dapat lebih rinci direpresentasikan sebagai objek semantik. Dalam hal LoD2 pintu dan jendela dapat dimodelkan sebagai objek tematik datar.

5. LoD 4

Untuk setiap bangunan atau bagian bangunan terluar geometris rinci dan interior diwakili oleh permukaan luar dan dalam rinci dan bentuk atap rinci. Semua jenis permukaan dan elemen bangunan bergerak bergerak dan non tambahan dapat diwakili dengan lebih rinci sebagai objek semantik.



Gambar 2.2. *Level of Detail* Tingkat 0 hingga 4 (Biljecki, 2013)

Adapun berikut ini deskripsi persyaratan *Level of Detail* adalah sebagai berikut.

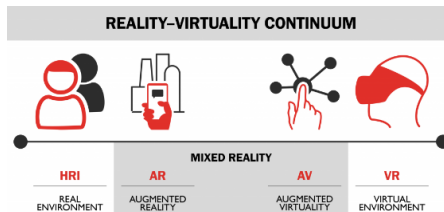
Tabel 2.1 Persyaratan Akurasi LoD *CityGML* (Fen dan Meng 2009 dalam Biljecki 2013)

Aspek	LoD 1	LoD 2	LoD 3	LoD 4
Skala model	Kota, regional	Distrik dalam kota	Model arsitektur (exterior), landmark	Model arsitektur (interior)
Kelas akurasi	Rendah	Menengah	Tinggi	Sangat tinggi
Akurasi posisi dan tinggi	5m	2m	0,5 m	0,2 m
Instalasi bangunan	-	-	Efek visual exterior representatif	Objek dalam bentuk ukuran sebenarnya
Generalisasi	Ukuran obyek >6x6 m	Ukuran obyek >4x4 m	Objek sebagai fitur nyata >2x2 m	Elemen konstruktif ditampilkan
Struktur	Datar	Tipe dan orientasi atap	Sesuai bentuk obyek sesungguhnya	Sesuai bentuk obyek sesungguhnya

2.5. Virtual Reality (VR)

Virtual environment (VE) atau *virtual reality* (VR) merupakan suatu ruang digital yang dapat mengetahui seluruh gerakan pengguna dan gambaran sekitarnya dengan menggabungkan dunia nyata dan dunia virtual yang berinteraksi secara *real-time* dalam bentuk 3D (Azuma, 1997). Pada awal 1990-an perkembangan di bidang *virtual reality* menjadi jauh lebih banyak dan istilah *virtual reality* sendiri menjadi sangat populer. Penggunaan *virtual reality* hampir di semua jenis media, sehingga masyarakat menggunakan istilah ini sangat sering dan menyalahgunakannya dalam banyak hal kasus. Alasannya adalah bahwa teknologi baru, menjanjikan, dan memukau ini menangkap lebih banyak minat orang-orang salah satu contohnya adalah grafik komputer (Mazuryk dan Gervautz, 1996).

Menurut Milgram dan Kishino (1994), terdapat celah yang menjadi pemisah antara lingkungan nyata dan lingkungan virtual. Diantara kedua lingkungan tersebut terdapat dua bagian yang menjadi jembatan dengan kecenderungan yang berbeda. Hal ini dapat juga disebut sebagai *Milgram's Reality-Virtuality Continuum*. Dua bagian tersebut yaitu *augmented reality* dan *augmented virtuality*. Posisi kedua bagian tersebut berbeda untuk *Augmented Reality* cenderung lebih dekat kepada lingkungan nyata, sedangkan *augmented reality* cenderung lebih dekat kepada lingkungan virtual.



Gambar 2.3. Kontinum *Virtual Reality* (Milgram dkk, 1994)

2.5.1. Tingkat Imersi pada *Virtual Reality* (VR)

Dalam sistem lingkungan virtual, komputer menghasilkan tayangan sensor yang dikirim ke indra

manusia. Jenis dan kualitas tayangan ini menentukan tingkat perendaman dan perasaan kehadiran di VR. Idealnya resolusi tinggi, berkualitas tinggi dan konsisten atas semua tampilan, dan informasi harus disajikan kepada semua pengguna indra (Slater dan Usoh, 1994). Selain itu, lingkungan itu sendiri harus bereaksi secara realistis pada pengguna. Namun, pada pengaplikasiannya sangat berbeda dari kasus ideal ini. Banyak aplikasi hanya merangsang satu atau beberapa indera, sangat sering dengan kualitas rendah dan tidak tersinkronisasi informasi. Menurut Von Schweber (1995), *virtual reality* (VR) dapat dikelompokkan sesuai dengan tingkat imersinya:

1. *Desktop VR*

Kadang-kadang disebut sistem *Window on World* (WoW). Ini adalah jenis aplikasi *virtual reality* yang paling sederhana. Ini menggunakan monitor konvensional untuk menampilkan gambar (umumnya monoscopic) dunia. Tidak ada output sensorik lain yang didukung.

2. *Fish Tank VR M*

Meningkatkan versi Desktop VR. Sistem ini mendukung pelacakan dan meningkatkan perasaan "ada" berkat gerakan itu efek paralaks. *Fish Tank VR M* masih menggunakan monitor konvensional (sangat sering dengan kaca LCD *shutter* untuk melihat stereoskopik) tetapi umumnya tidak mendukung keluaran sensorik.

3. Sistem Imersif

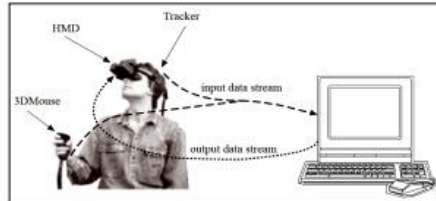
Versi terakhir dari sistem VR. Mereka membiarkan pengguna sepenuhnya perendaman dalam HMD yang mendukung stereoskopik *view of the scene* sesuai dengan posisi dan orientasi pengguna. Sistem ini mungkin ditingkatkan oleh audio, *haptic* dan *sensory interfaces*.

2.5.2. Sistem *Virtual Reality* (VR)

Teknologi *virtual reality* merupakan interaksi antara manusia dengan teknologi mesin yang menghasilkan lingkungan simulasi hidup dan mensimulasikan perilaku yang beragam seperti eksplorasi dan interaksi dengan lingkungan (Halarnkar dkk, 2012).

2.5.2.1. Komponen *Virtual Reality* (VR)

Pengguna dilengkapi dengan layar yang dipasang di kepala, pelacak dan opsional perangkat manipulasi, misalnya *mouse* 3D. Sebagaimana manusia berjalan-jalan dan rotasi kepala untuk mengubah sudut pandangnya deskripsi data perilaku pengguna diberikan kepada komputer sebagai *input* dari perangkat. Kemudian komputer memproses informasi secara *real-time* dan membuat hasil keluaran atau *output* yang sesuai ke pengguna (Mazuryk dan Gervautz, 1996).



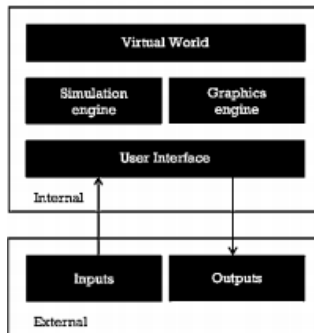
Gambar 2.4. Komponen *Virtual Reality* (VR) (Mazuryk dan Gervautz, 1996)

2.5.2.2. Desain *Virtual Reality* (VR)

Pada desain sistem *virtual reality* (VR) terdapat enam komponen utama (Maurya, 2009):

1. *Virtual World*
2. *Simulation Engine*
3. *Graphics Engine*
4. *User Interface*
5. *User Inputs*
6. *User outputs*

Virtual world, simulation engine, dan user interface bertindak sebagai komponen internal. *User input* dan *user output* bertindak sebagai komponen eksternal dari sistem *virtual reality*. *Virtual world* terdiri dari basis data yang terhubung dengan berbagai representasi geometris serta atribut yang akan dilihat pengguna. Format representasi ini bergantung pada *simulation engine* dan *graphics engine* yang digunakan. *Graphics engine* bertanggung jawab untuk menghasilkan gambar atau tampilan yang akan terlihat di dunia VR. Hal ini dilakukan dengan memperhatikan basis data, posisi, dan orientasi pengguna saat ini di dunia VR sesuai dengan gerakan kepala dan tubuh pengguna. Tugas dari *simulation engine* adalah mendukung tetap hidupnya dan meniru lingkungan buatan tampak nyata. Selain itu *simulation engine* berperan untuk menjaga kegiatan lingkungan, mengendalikan perubahan terhadap waktu, dan bereaksi terhadap gerakan pengguna. Hal ini juga termasuk interaksi atau *rendering* dari objek yang diprogram dan disimulasikan secara fisik dalam sistem VR tersebut. *User interface* merupakan bagian dari komponen internal dan berfungsi sebagai penghubung yang menghubungkan *virtual world, simulation engine, dan graphics engine* dengan perangkat lunak dan perangkat keras dari pengguna (Maurya, 2009).



Gambar 2.5. Desain Internal dan Eksternal dari Sistem VR (Maurya, 2009)

2.5.3. Faktor Penting VR

Menurut Maurya (2009), terdapat empat faktor utama dalam *virtual reality*:

1. *Virtual Realism*

Tujuan utama dari lingkungan virtual adalah untuk mensimulasikan dunia nyata. Sehingga kita harus memiliki pengetahuan tentang cara "menipu indra pengguna". Kesulitan ini sangat kompleks dikarenakan disatu sisi kita harus aktif menyediakan pengguna dengan perasaan yang realistis dan disisi lain solusi ini harus layak.

2. *Image Resolution*

Gambar-gambar yang dihasilkan oleh komputer terdiri dari piksel yang bereda atau elemen gambar. Ukuran dan jumlah ini bervariasi sesuai dengan ukuran dan resolusi layar. Pikselnya tidak dapat diidentifikasi secara jelas pada resolusi yang lebih tinggi oleh karena itu layar tampak bersebelahan dengan pengguna. Resolusi gambar terutama terdiri dari kecerahan warna dan bayangan yang dilihat oleh pengguna di lingkungan VR.

3. *Frame Rate*

Dengan tujuan untuk mencapai kelancaran arus gambar, gambar yang lebih lama perlu diganti dengan yang baru pada tingkat yang sangat cepat, yaitu dengan menggunakan frekuensi tinggi. Pada umumnya, Kita mendapatkan serangkaian gambar yang bersebelahan dengan kecepatan lebih dari 20 Hz atau dikenal sebagai *Critical Fusion Frequency* (CFF). Untuk mencapai tingkat ini, sistem harus diganti dengan gambar yang baru lebih dari 20 kali setiap detik. Namun hal ini dapat meningkatkan beban pada sistem.

4. *Latency*

Latency atau juga disebut *lag* merupakan faktor penting yang berhubungan dengan tingkat realisme dan tolerabilitas dalam pengaturan virtual. *Latency* adalah penundaan yang disebabkan antara aksi dan tindakan peserta tanggapan aplikasi terkait. Di dunia nyata, indera manusia terbiasa dengan kecepatan reaksi tertentu untuk tindakan dalam berbagai situasi. Penting untuk mempertahankan kecepatan yang sama dalam pengaturan virtual atau perasaan pengguna akan menjadi bingung karena lingkungan akan bertentangan dengan otak saat pengguna ke dunia nyata. Jika terlalu lama menyediakan efek tertentu kepada pengguna di lingkungan VR maka realitisme dari VR tersebut akan hilang.

2.5.4. Navigasi dan Manipulasi dalam VR

Memanipulasi melibatkan kegiatan memilih dan memindahkan objek. Pengguna perlu memanipulasi objek virtual dengan manipulasi objek yang memungkinkan pengguna untuk relokasi atau reorientasi. Setelah objek dipilih, pengguna harus bisa memindahkan, memutar, skala, mengubah atribut dan sebagainya. Hal ini dapat dicapai

dengan menentukan penekanan tombol khusus atau gerakan tangan (Burdea dan Coiffet, 2008).

Menurut Burdea dan Coiffet (2008), navigasi dalam *virtual reality* memiliki dua komponen utama:

1. *Travel*

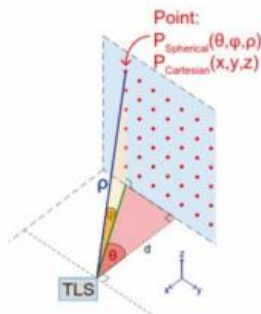
Melibatkan perpindahan dari lokasi saat ini ke titik yang diinginkan.

2. *Way Finding*

Komponen ini mengacu pada mencari dan menetapkan rute untuk mendapatkan tujuan perjalanan dalam lingkungan virtual.

2.6. Terrestrial Laser Scanning (TLS)

Terrestrial Laser Scanning (TLS) adalah sistem penginderaan jauh untuk menentukan jarak suatu benda dengan cara menganalisis pantulan kembali sinar laser pada permukaan suatu benda. Metode survei ini memungkinkan akuisisi data posisi 3 dimensi titik permukaan suatu objek dalam jumlah yang sangat banyak. TLS memungkinkan melakukan survei di daerah yang tidak terjangkau alat survei tradisional. Luaran dari hasil akuisisi data TLS adalah *point cloud* (Soudarissanane, 2016).



Gambar 2.6. Geometri Akuisisi Data TLS (Soudarissanane, 2016)

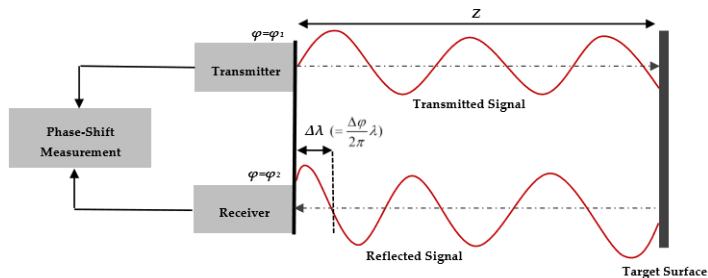
Keterangan:

θ : besaran sudut horizontal dari TLS titik P

- φ : besaran sudut vertikal dari TLS titik P
- p : besaran resultan vektor dari TLS ke arah titik P
- x : posisi titik P pada sumbu x
- y : posisi titik P pada sumbu y
- z : posisi titik P pada sumbu z

Prinsip kerja pada TLS memiliki dua prinsip yaitu *triangulation based* dan *time of flight*. Pada prinsip *time of flight* dibagi menjadi dua prinsip pengukuran yaitu *pulse based* dan *phase based* (Moussa, 2014). Namun, pada penelitian kali ini prinsip pengukuran TLS yang digunakan adalah prinsip *phase based*. Prinsip dari pengukuran menggunakan *phase based* adalah gelombang kontinu dari *scanner* pergi ke sekitar pengukuran pulsa yang pendek dengan menggunakan presisi tinggi dengan panjang gelombang sinar laser. Gelombang tersebut biasanya dimodulasi menggunakan modulasi sinusoidal amplitudo berbasis (AM) atau frekuensi berbasis (FM) (Genechten, 2008).

Berikut ini adalah gambar prinsip kerja pengukuran TLS menggunakan prinsip *phase based*.



Gambar 2.7. Prinsip Kerja *Phase Based* pada TLS (Moussa, 2014)

Berikut ini adalah rumus dalam prinsip kerja *phase based* pada *terrestrial laser scanner* (TLS).

$$Z = \frac{1}{2} c\Delta t \quad (1.1)$$

Refleksi yang tersebar dikumpulkan dan ukuran perbedaan fase sinyal dikirim dan diterima oleh sinyal yang menghasilkan *time delay* (gambar 2.9). Pengurangan dua sinyal sinusoidal termodulasi dapat dirumuskan dengan persamaan berikut.

$$S(t) = A \sin(\omega t - \Delta\varphi) = A \sin(2\pi f_m t - \Delta\varphi) = A \sin(2\pi f_m(t - \Delta\varphi/2\pi f_m)) \quad (1.2)$$

Dimana (A , f_m , λ_m) merupakan amplitudo, frekuensi modulasi, dan gelombang cahaya termodulasi.

Relasi antara perbedaan fase ($\Delta\varphi$), frekuensi modulasi, dan *time delay* (Δt) dapat dideskripsikan sebagai berikut.

$$\Delta t = \frac{\Delta\varphi}{2\pi f_m} ; f_m = c/\lambda_m \quad (1.3)$$

Berdasarkan persamaan 1.1 dan 1.3 maka perhitungan jarak menuju target menggunakan prinsip *phase based* dapat dirumuskan dengan persamaan berikut.

$$Z = \frac{1}{2} c\Delta t = \frac{1}{2} \lambda f_m \frac{\Delta\varphi}{2\pi f_m} = \frac{\Delta\varphi}{4\pi} \lambda \quad (1.4)$$

2.6.1. Point Cloud

Point Cloud adalah sekumpulan titik yang merepresentasikan batas dari obyek 3 dimensi (Linsen, 2001). Dalam sistem koordinat 3 dimensi, titik-titik ini biasanya direpresentasikan dalam koordinat X, Y, Z yang mewakili permukaan eksternal dari suatu objek. *Point cloud* digunakan dalam berbagai bidang ilmu seperti desain, manufaktur, bahkan infrastruktur. Contohnya adalah penggunaan *point cloud* untuk pembentukan model *terain digital*. Penggunaan data *point cloud* bertujuan untuk analisis obyek lebih lanjut terutama dari aspek geometrinya.



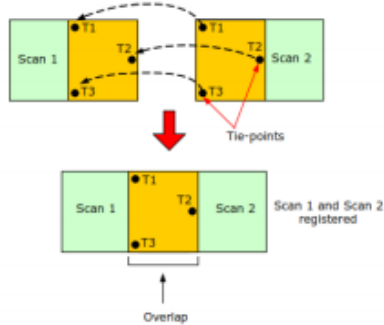
Gambar 2.8. *Point Cloud* (Rusu dan Cousins, 2011)

2.6.2. Registrasi Data *Point Cloud*

Konsep dari *Terrestrial Laser Scanning* adalah melakukan pemindaian secara horizontal 360 derajat. Namun untuk memperoleh data topografi yang baik, pemindaian tidak cukup dilakukan dengan satu kali berdiri alat. Maka perlu adanya penggabungan beberapa *scanworld* (istilah titik berdiri alat pada *laser scanning*) ke dalam sistem koordinat yang sama. Konsep registrasi pada metode *laser scanning* dapat dibedakan menjadi 3 yaitu Metode *Target Based*, *Cloud to Cloud*, dan Kombinasi (Geosystems, 2006).

1. Metode *Target Based*

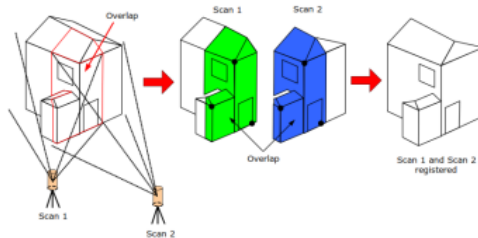
Merupakan cara registrasi data yang paling umum. Untuk menentukan 6 parameter transformasi antara *scanworld* 1 dan *scanworld* 2 maka perlu diketahui 6 koordinat, yang terdistribusi melalui 3 titik yang tidak segaris. Pada 3 titik tersebut dipasang *sphere* sebagai target. *Sphere* adalah obyek berbentuk bola berwarna terang yang diletakkan di daerah *overlap* dari kedua *scanworld* yang akan di registrasi.



Gambar 2.9. Registrasi Data Dengan Metode *Target Based* (Reshetyuk, 2009)

2. Metode *Cloud to Cloud*

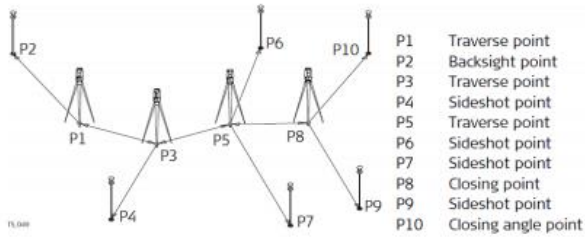
Merupakan cara registrasi dengan menentukan *point cloud* yang sama antar dua atau lebih *scanworld* sebagai titik ikat. Ketelitian nilai koordinatnya bergantung pada seberapa jauh perbedaan posisi saat pendefinisian titik ikat. Namun metode ini memiliki kelebihan yaitu mempercepat proses akuisisi data karena tidak perlu mempertimbangkan persebaran *sphere* sebagai target.



Gambar 2.10. Registrasi *Cloud to Cloud* (Reshetyuk, 2009)

3. Metode Poligon atau *Travers*

Merupakan cara registrasi dengan mendirikan alat pada posisi dan orientasi yang sudah teracu pada kerangka kontrol pemetaan yang ada, kemudian memasukkan nilai koordinat titik kontrol pada saat pengaturan TLS sebelum dilakukannya scanning. Registrasi *travers* merupakan cara reSIGtrasi pra-akuisisi data sehingga data *point cloud* hasil akuisisi sudah ter-referensi pada sistem koordinat tanah (Akmal, 2016).



Gambar 2.11. Registrasi Poligon atau *Traverse*
(Geosystems, 2006)

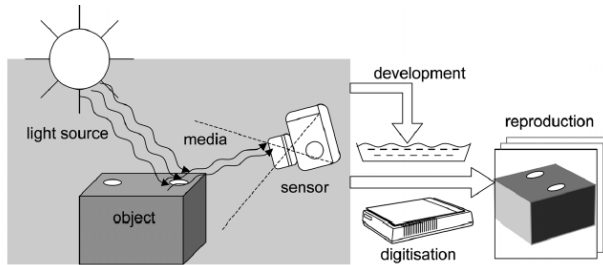
2.6.3. Georeferensi

Georeferensi dilakukan agar data TLS terintegrasi dalam data geospasial. Tahap ini dilakukan dengan meregistrasi seluruh data *point clouds* dari objek ke dalam sistem koordinat eksternal. Sebagian besar proses georeferensi diubah ke sistem koordinat geosentrik berdasarkan data pengukuran benchmark GPS geodetik yang memiliki ketelitian yang baik. Ketelitian yang baik diperlukan karena ketelitian dari titik referensi akan memengaruhi ketelitian nilai koordinat dari semua titik yang dihasilkan oleh pengukuran *laser scanner* (Quintero, 2008).

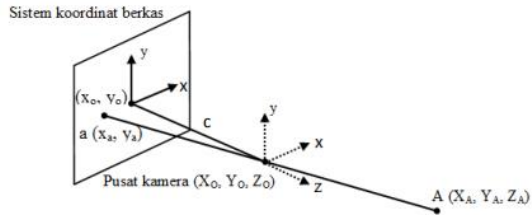
2.7. Fotogrametri Jarak Dekat

Fotogrametri adalah seni, ilmu dan teknologi dalam memperoleh informasi yang terpercaya mengenai obyek-obyek dan lingkungan fisis, melalui proses perekaman, pengukuran dan penafsiran citra fotografik dan pola-pola energi elektromagnetik yang bercahaya dan gejala lainnya (Suharsana, 1997). Fotogrametri meliputi metode pengukuran gambar dan interpretasi untuk mendapatkan bentuk dan lokasi objek dari satu atau lebih foto objek tersebut. Tujuan utama dari pengukuran menggunakan Fotogrametri adalah rekonstruksi tiga dimensi dari suatu objek dalam bentuk digital atau bentuk grafis (Luhmann, 2006). Lingkup Fotogrametri di luar pemetaan yang menggunakan foto sebagai sarana maupun Fotogrametri sebagai suatu cara adalah Fotogrametri jarak dekat. Fotogrametri jarak dekat dicirikan bahwa jarak antara obyek dan kamera kurang dari 300 meter (Suharsana, 1997).

Pada dasarnya konsep yang digunakan dalam Fotogrametri jarak dekat adalah konsep Fotogrametri analitis yang diaplikasikan pada pemotretan terestris. Prinsip yang digunakan dalam Fotogrametri jarak dekat adalah prinsip kolinearitas (kesegarisan) yang dapat didefinisikan bahwa titik utama kamera, koordinat titik pada foto, dan posisi 3 dimensi titik tersebut pada ruang berada pada satu garis lurus. Kondisi kolinearitas ini tentu saja digunakan sebagai solusi umum saat orientasi relatif baik secara aerial maupun terestris. Untuk rekonstruksi objek dari foto atau gambar perlu menggambarkan proses optik di mana gambar dibuat. Hal ini termasuk semua elemen yang berkontribusi pada proses ini seperti sumber cahaya, sifat permukaan objek, media tempat cahaya berjalan, sensor dan teknologi kamera, pemrosesan gambar, pengembangan film, dan pemrosesan lebih lanjut. Setiap titik gambar memiliki nilai dalam bentuk data radiometrik (intensitas, nilai abu-abu, nilai warna) dan data geometrik (posisi dalam gambar). Dari pengukuran ini dan transformasi matematis antara gambar dan objek ruang, objek akhirnya bisa dimodelkan (Luhmann, 2006).



Gambar 2.12. Proses Fotogrametri jarak dekat: Objek menjadi Model (Luhmann, 2006)



Gambar 2.13. Prinsip kondisi kolinearitas (Atkinson, 1996)

Pada foto terestris, sumbu x pada sistem koordinat foto sejajar dengan sumbu X pada koordinat tanah, sumbu z pada sistem koordinat foto sejajar dengan sumbu Y pada sistem koordinat tanah, dan sumbu y pada sistem koordinat foto sejajar dengan sumbu Z pada sistem koordinat tanah. Hal tersebut yang menyebabkan perbedaan antara foto udara dan foto terestris. Persamaan kolinearitas untuk titik obyek A dan titik citra a yang terlihat pada foto dapat ditulis dalam persamaan matriks sebagai berikut (Atkinson, 1996).

$$\begin{bmatrix} x_a - x_o \\ y_a - y_o \\ -c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a - x_o \\ y_a - y_o \\ z_a - z_o \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Matriks R merupakan matriks rotasi :

$$R_{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix}; R_{\varphi} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix};$$

$$R_K = \begin{bmatrix} \cos K & \sin K & 0 \\ -\sin K & \cos K & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$R = R_{\omega} R_{\varphi} R_K \quad (2.3)$$

$$R =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \omega \cdot \cos K & \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos K + \sin \omega \cdot \sin K & -\cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos K + \sin \omega \cdot \sin K \\ \cos \omega \cdot \sin K & -\sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin K + \cos \omega \cdot \cos K & \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos K + \sin \omega \cdot \cos K \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cdot \cos \varphi & \cos \omega \cdot \cos \varphi \end{bmatrix}$$

$$x_a - x_o = \frac{-c [r_{11}(X_O - X_A) + r_{12}(Y_O - Y_A) + r_{13}(Z_O - Z_A)]}{[r_{31}(X_O - X_A) + r_{32}(Y_O - Y_A) + r_{33}(Z_O - Z_A)]} \quad (2.4)$$

$$y_a - y_o = \frac{-c [r_{21}(X_O - X_A) + r_{22}(Y_O - Y_A) + r_{23}(Z_O - Z_A)]}{[r_{31}(X_O - X_A) + r_{32}(Y_O - Y_A) + r_{33}(Z_O - Z_A)]} \quad (2.5)$$

Keterangan :

x_a, y_a = koordinat titik A di foto.

x_o, y_o = koordinat titik pusat foto.

X_A, Y_A, Z_A = koordinat titik A di permukaan bumi.

X_O, Y_O, Z_O = koordinat pusat kamera.

c = panjang fokal.

r_{ij} = elemen matriks rotasi.

R_{ω} = matriks rotasi terhadap sumbu X.

R_{φ} = matriks rotasi terhadap sumbu Y.

R_K = matriks rotasi terhadap sumbu Z

2.8. Structure from Motion (SFM)

Pada awalnya teknologi SFM dikembangkan untuk membangun model tiga dimensional dari obyek dua dimensional seperti foto (*image*). Meskipun tergolong baru dalam kajian geografi, namun pada dasarnya teknologi SFM ini telah dikembangkan sejak akhir tahun 1970 dibidang teknik komputer (Ullman, 1979). Konsep utama dari SFM adalah ilmu fotogrametri

yaitu melakukan pengukuran secara kuantitatif menggunakan gambar hasil fotografi kamera. Perbedaan yang mendasar diantara keduanya adalah pada teknik SFM tidak diperlukan setting awal kamera seperti posisi dan arah kamera. Dalam tehnik SFM juga tidak diperlukan kalibrasi gambar stereoskopis yang dihasilkan. SFM menggunakan gambar stereoskopis yang banyak (tiga atau lebih) dan melakukan perhitungan trigonometri seperti pada teknik fotogrametri untuk menghasilkan dataset yang bersifat tiga dimensional. SFM berbasis multi gambar atau foto, sehingga sangat direkomendasikan untuk menggunakan sensor yang bergerak (Ulman, 1979).

SFM membutuhkan *input* algoritma ekstraksi fitur berupa foto yang saling *overlap* untuk kemudian dapat direkonstruksi model tiga dimensinya, namun SFM secara mendasar berbeda dari fotogrametri konvensional yaitu pada posisi dan orientasi kamera yang tidak perlu mengkhhususkan jaringan target posisi tiga dimensi. Pada proses SFM digunakan data redundan dan prosedur iteratif *bundle adjustment*, berdasarkan fitur yang terekstrak dari gambar yang saling bertampalan (*overlap*) (Snavely, 2010).

Gambar 3 dimensi didapatkan berdasarkan perhitungan tertentu menggunakan proyeksi relatif geometri dari setiap posisi kamera. Perangkat lunak akan melakukan perhitungan dan rekonstruksi tiga dimensional secara otomatis berdasarkan hasil dari interpolasi seluruh titik yang bertampalan pada setiap foto atau gambar (Westoby dkk, 2012). Saat ini, banyak sekali perangkat lunak yang dapat digunakan untuk menerapkan teknik SFM, diantaranya adalah *Agisoft Photo Scan Profesional*, *Pix4D mapping*, *Photo Modeler Scanner*, *Autodesk Image Modeler*, dan *D-Scuptor*. Dengan menggunakan perangkat lunak ini, perhitungan fotogrametri dan proses rekonstruksi tiga dimensional dapat dilakukan dalam waktu yang relatif singkat.

2.9. Kualitas Pemodelan Objek 3 Dimensi

Kualitas hasil akhir suatu model akhir 3D obyek dapat diuji dari segi kuantitas dan kualitasnya. Untuk segi kuantitas

dinyatakan dalam besaran *Root Mean Square Error* (RMSe) dan standar deviasi, sementara dari segi kualitas dapat dinyatakan dalam skala *Level of Detail* (LoD).

1. *Root Mean Square* (RMSe)

Root Mean Square (RMSe) adalah ukuran perbedaan antara nilai besaran yang diprediksi dengan nilai yang diamati sebenarnya. RMSe digunakan untuk menyatakan akurasi suatu prediksi besaran dan didefinisikan dengan persamaan berikut (ERDAS, 1999).

$$\text{RMSe} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2}{n}} \quad (3.1)$$

Keterangan:

$x_{i,1}$ = Nilai prediksi ke-i

$x_{i,2}$ = Nilai pengamatan ke-i

n = jumlah pengamatan

2. Standar Deviasi

Standar deviasi lebih menunjukkan kecenderungan penyebaran nilai suatu prediksi terhadap nilai prediksi rata-ratanya sendiri. Standar deviasi digunakan dalam menyatakan presisi dan didefinisikan dengan persamaan berikut (ERDAS, 1999).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} \quad (3.2)$$

Keterangan:

\bar{x} = nilai rata-rata prediksi

x_i = nilai prediksi ke i

2.10. Penelitian Terdahulu

Pada bagian ini akan dibahas beberapa penelitian serupa yang telah dilakukan oleh peneliti-peneliti lain.

1. Penelitian Pembangunan *Virtual Reality* SIG Untuk Dokumentasi Konservasi Warisan Budaya (Studi Kasus:

Kompleks Candi Sewu) pada tahun 2013. Pada penelitian ini dilakukan pembangunan Sistem Informasi Geografis 3D dan *virtual-reality* untuk mendokumentasikan warisan budaya berupa candi yang akan dimanfaatkan sebagai sumber informasi penting mengenai catatan sejarah yang tertuang didalamnya. Selain itu dapat menganalisis informasi penting apa saja yang diperlukan untuk suatu kepentingan tertentu, misalnya untuk keperluan arkeologi atau untuk sumber pengetahuan orang-orang yang ingin mengetahui sejarah Candi Sewu. Tahapan yang dilakukan meliputi perancangan desain basis data, ekstraksi data yang meliputi pemodelan 3D, georeferensi model, segmentasi model bangunan candi, implementasi basis data, serta proses visualisasi. Pembuatan SIG dalam penelitian ini menggunakan konsep basis data relasional objek (*Object Relational Database*) dan teknik visualisasinya berupa teknik *virtual reality* (Threesiana dkk, 2013).

2. Penelitian yang kedua adalah Analisis Pemodelan 3D Candi Jawi Menggunakan Wahana Quadcopter dan *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) pada tahun 2018. Pada penelitian ini dilakukan pengukuran Candi Jawi meliputi pemotretan dengan quadcopter, pengamatan *Ground Control Point* (GCP), pengukuran *Independent Check Point* (ICP), dan pemindaian candi dengan *Terrestrial Laser Scanner* (TLS). Hasil yang diperoleh ialah model tiga dimensi hasil data quadcopter RMSe X, Y, Z sebesar 0.017 meter, 0.017 meter, dan 0.018 meter. Sementara besar nilai RMSe model tiga dimensi hasil olahan *point cloud* TLS untuk X, Y, dan Z ialah 0.056 meter, 0.066 meter, dan 1.44 meter. Kedua model dari kedua alat menunjukkan hasil yang relatif kecil karena bernilai kurang dari 0.5 meter dan memenuhi syarat *Level of Detail* (LoD) 3 untuk konsep visualisasi eksterior model bangunan, kecuali pada nilai *Root Mean Square Error*

(RMSe) Z model 3D data *point cloud* TLS (Mulyono dkk, 2018).

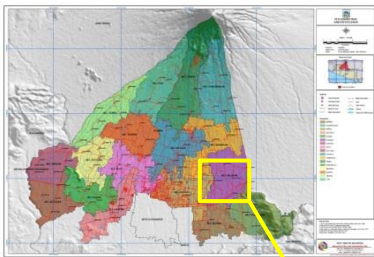
3. Penelitian yang ketiga adalah Pengembangan Museum Virtual Interaktif Menggunakan Teknologi *Desktop Virtual Reality* Pada Museum Ranggawarsita pada tahun 2015. Pada Penelitian ini metode yang digunakan adalah *Research and Development*, dengan tahapan-tahapan dari potensi dan masalah sampai menghasilkan produk akhir. Hasil penelitian berupa museum virtual yang dibuat dengan menggunakan *game engine* yaitu Unity3D. Media ini dikembangkan menggunakan *Third Person Controller*. Karakter dibuat menggunakan program Blender, dengan beberapa animasi 3D Fitur yang ada adalah interaksi pengguna terhadap objek yang dapat menampilkan informasi terhadap objek museum yang ditemui (Vidiardi dkk, 2015).
4. Penelitian yang keempat adalah Pemodelan 3 Dimensi Candi Wringinlawang Menggunakan Metode *Structure from Motion* untuk Dokumentasi Cagar Budaya pada tahun 2017. Pada penelitian ini dilakukan pemotretan candi dengan menggunakan kamera non metrik Sony Exmor 12.4 M yang dibantu dengan wahana DJI Phantom 3 menghasilkan 155 buah foto, 465,487 titik *sparse cloud*, 5,996,415 titik *dense cloud*, 1,155,740 *faces*, dan 580.147 *vertices* dengan pemodelan 3D yang menggunakan metode *structure from motion*. Berdasarkan hasil penelitian ini didapatkan nilai RMSe dari ICP untuk sumbu X sebesar 0.042 m, sumbu Y sebesar 0.047 m, dan untuk z sebesar 0.048 m. Dari segi akurasi, besar nilai RMSE koordinat model Candi yang dihasilkan termasuk dalam LoD orde 3 yakni masih masuk batas toleransi sebesar 0.5 m. Dari segi visual, struktur yang terbentuk menyerupai objek sesungguhnya dengan penampakan eksterior bangunan Candi Wringinlawang (Naufatunnisa dan Cahyono, 2017).

5. Penelitian yang kelima adalah Integrasi Data Perekaman Fotogrametri Digital dan *Terrestrial Laser Scanner* untuk Bangunan Warisan Budaya pada tahun 2014. Pada penelitian ini dilakukan integrasi antara data pengukuran menggunakan TLS dan fotogrametri dengan pemrosesan registrasi dengan menggunakan metode yang berbeda-beda. Pada hasil integrasi menggunakan metode registrasi menggunakan *accurate space resection* hasil dari RMSe ICP pada sumbu X sebesar 0.059 m, sumbu Y sebesar 0.042 m, dan sumbu Z sebesar 0.032 m. Metode registrasi menggunakan metode SfM memiliki hasil RMSe ICP pada sumbu X sebesar 0.014 m, sumbu Y sebesar 0.029 m, dan sumbu Z sebesar 0.012 m. Sedangkan untuk metode registrasi menggunakan relasi geometrik dari *keypoints* hasil dari RMSe ICP pada sumbu X sebesar 0.02 m, sumbu Y sebesar 0.005 m, dan sumbu Z sebesar 0.005 m. Pada penelitian ini didapat hasil terbaik menggunakan registrasi dengan metode relasi geometrik dari *keypoints* pada metode ini dibutuhkan pertampalan yang baik dari setiap stasiun (Moussa, 2014).

BAB III METODOLOGI

3.1. Lokasi Penelitian

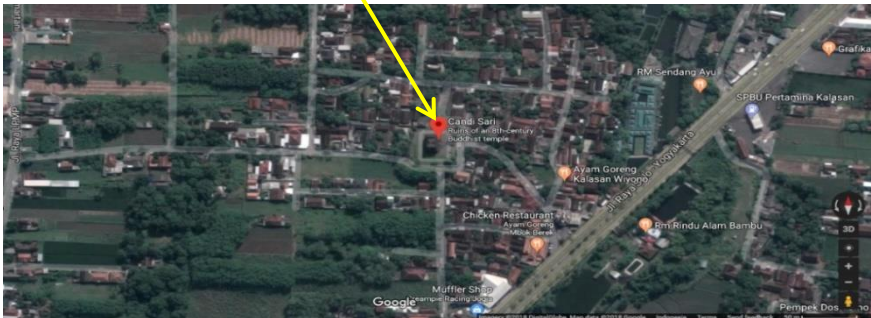
Lokasi penelitian ini adalah Candi Sari dengan ukuran candi sebesar 17,30 x 10 m dengan ketinggian keseluruhan candi dari permukaan tanah hingga puncak stupa mencapai 17 m. Candi Sari berada di Jl. Tirtomartani, Kalasan, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta yang terletak pada koordinat $-7^{\circ}45'41.66''$ LS dan $110^{\circ}28'19.5''$ BT (BPCB, 2013).



a.



b.



c.

Gambar 3.1. a. Peta Lokasi Penelitian (DPPK Jogja, 2012); b. Foto Candi Sari (Dokumentasi); c. Peta Kawasan Candi Sari (Gmaps, 2018)

3.2. Data dan Peralatan

3.2.1. Data Penelitian

3.2.1.1. Data Primer Penelitian

Data primer merupakan data yang diambil oleh peneliti secara langsung melalui suatu pengukuran atau survei. Pada penelitian ini data primer yang digunakan adalah informasi sebagai atribut yang berisi informasi mengenai historikal, arsitektural, fungsi, dan kondisi bangunan pada Candi Sari. Adapun detail mengenai atribut tersebut adalah sebagai berikut.

1. Informasi Historikal: informasi historikal mencakup informasi mengenai sejarah dibangunnya Candi Sari dan tahun dibangunnya Candi Sari.
2. Informasi Arsitektural: informasi arsitektural mencakup informasi mengenai karakteristik bangunan dan jenis batuan bangunan candi.
3. Informasi Fungsi: informasi fungsi mencakup informasi mengenai sejarah fungsi dibangunnya Candi Sari pada masanya dan pada masa kini.
4. Kondisi Bangunan: informasi mengenai kondisi saat ini dari Candi Sari dan rekonstruksi dari bagian yang hilang pada Candi Sari.

3.2.1.2. Data Sekunder Penelitian

Data sekunder merupakan data yang telah tersedia dari instansi atau penelitian sebelumnya, sehingga peneliti dapat menggunakan data tersebut. Pada penelitian ini data sekunder yang digunakan adalah *raw* data hasil pemotretan menggunakan metode fotogrametri jarak dekat dan *point cloud* hasil

pengukuran TLS Candi Sari dari tim KK-INSIG. Adapun detail data tersebut adalah sebagai berikut.

1. Fotogrametri jarak dekat
 - a. Jumlah foto eksterior Candi Sari:
 - i. Menggunakan wahana *drone* berjumlah sebanyak 742 foto.
 - ii. Menggunakan foto terestris berjumlah sebanyak 512 foto.
 - b. Jumlah foto interior Candi Sari:
 - i. Menggunakan foto terestris berjumlah sebanyak 192 foto.

Adapun wahana yang digunakan oleh tim KK-INSIG untuk metode ini adalah DJI Phantom 4 yang dilengkapi dengan kamera tipe FC330 12 megapixel dengan 3,6 mm lensa dan *focal length* 4 mm dan Kamera Canon EOS 5 DS R dengan *focal length* 24 mm.

2. *Terrestrial Laser Scanner* (TLS)
 - a. *Point cloud* yang telah teregistrasi dari hasil pengukuran *Terrestrial Laser Scanner* (TLS).

Adapun jenis TLS yang digunakan oleh Tim KK-INSIG untuk penelitian ini adalah Faro Focus 3D dengan tipe *phase-based*, jangkauan jarak pemindaian 10 m hingga 25 m, dan resolusi sebesar 0,9 mm hingga 2,2 mm.

3. Koordinat GCP (*Ground Control Point*) dan ICP (*Independent Check Point*).

3.2.2. Peralatan Penelitian

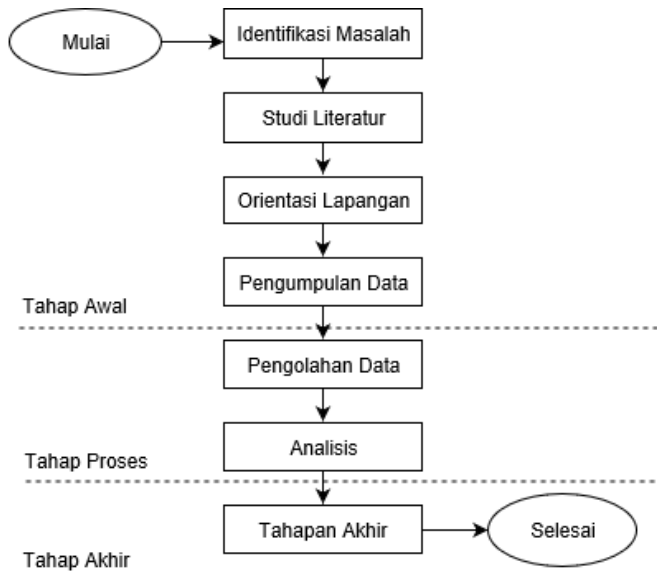
Peralatan yang digunakan oleh peneliti dalam penelitian ini berupa perangkat lunak dan perangkat keras. Adapun peralatan penelitian tersebut adalah sebagai berikut.

1. Perangkat lunak
 - a. Perangkat lunak pengolah foto udara
 - b. Perangkat lunak pengolah *rendering* dan *virtual reality* (VR)
 - c. *Cloudcompare*
 - d. Aplikasi pemutar video *virtual reality* (VR)
2. Perangkat Keras
 - a. *VR-BOX*
 - b. Ponsel

3.3. Metodologi Penelitian

3.3.1. Tahap Pelaksanaan Penelitian

Tahapan dari penelitian tugas akhir ini dapat ditunjukkan dalam Gambar 3.2. berikut.



Gambar 3.2. Diagram Alir Pelaksanaan Penelitian

Berikut merupakan penjelasan tahap persiapan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Identifikasi Masalah

Sebelum sebuah penelitian dikerjakan, peneliti harus melakukan identifikasi awal mengenai kasus yang akan diteliti, baik berupa perumusan masalah, tujuan, dan manfaat dari pembuatan *virtual reality*.

2. Studi Literatur

Sebelum melakukan pengolahan data, peneliti mengumpulkan referensi yang akan menunjang langkah-langkah pengolahan hingga tahap analisis, diantaranya yaitu meliputi metode untuk melakukan pemodelan 3D menggunakan perangkat lunak pengolah foto, *input* hasil model 3D ke dalam Unreal Engine sehingga mendapatkan bentuk *virtual reality*, dan integrasi antara pemodelan 3D dengan informasi semantik Candi Sari.

3. Orientasi Lapangan

Pada tahap ini peneliti melakukan orientasi lapangan dengan tujuan untuk mengetahui kondisi sebenarnya di lapangan sehingga dapat menentukan metode dalam pengumpulan informasi mengenai Candi Sari.

4. Pengumpulan Data

Langkah ini merupakan kegiatan dalam mengumpulkan data yang dibutuhkan untuk menjawab permasalahan dalam penelitian Tugas Akhir. Adapun data yang diambil adalah sebagai berikut:

- a. Data Grafis

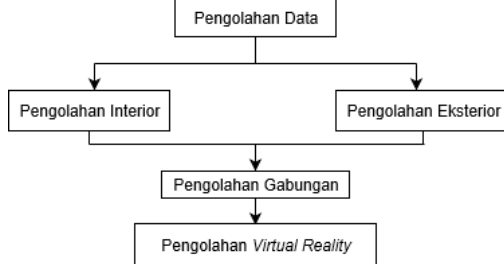
Data grafis ini berupa titik-titik hasil pengukuran menggunakan TLS dan foto hasil pemotretan menggunakan metode fotogrametri jarak dekat.

- b. Data Tekstual

Data tekstual ini merupakan data primer peneliti dalam melakukan penelitian. Data tekstual ini berupa informasi mengenai historikal, arsitektural, fungsi, dan kondisi bangunan dari Candi Sari.

3.3.2. Tahap Pengolahan Data

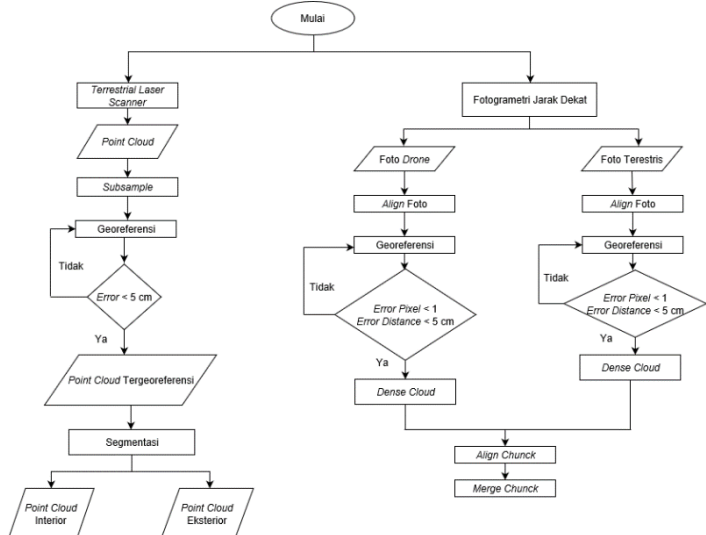
Adapun dalam tahapan pengolahan data dibagi menjadi beberapa proses. Pembagian tahapan pengolahan data ini dapat ditunjukkan pada diagram alir dibawah ini.



Gambar 3.3. Pembagian Tahapan Pengolahan Data

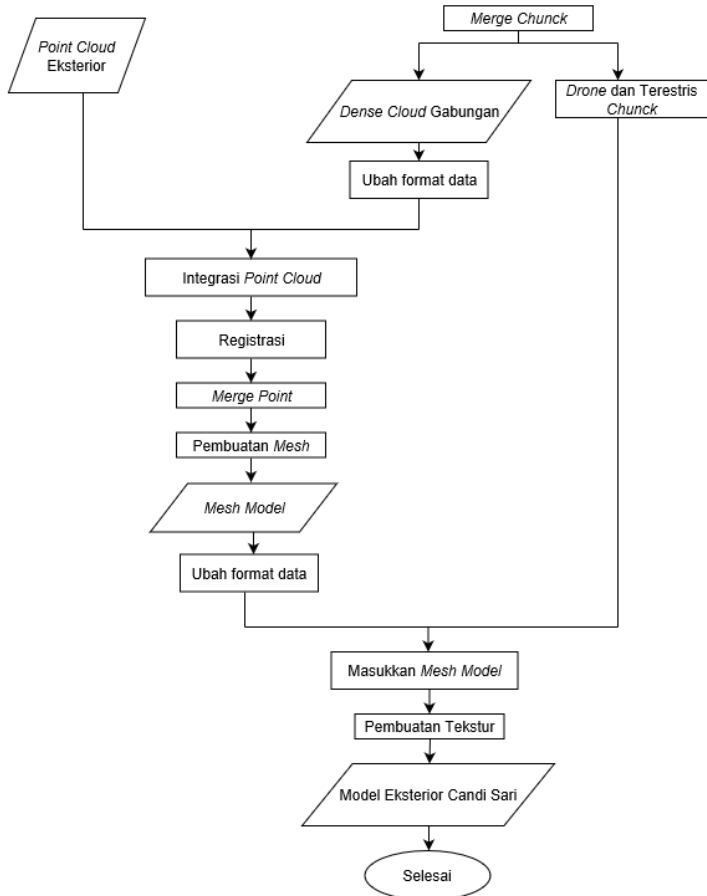
3.3.2.1. Pengolahan Eksterior Candi Sari

Tahapan dalam pengolahan eksterior Candi Sari dapat ditunjukkan dalam Gambar 3.4. berikut ini.



Gambar 3.4. Diagram Alir Pengolahan Eksterior Candi Sari

Lanjutan Gambar 3.4.



Gambar 3.4. Diagram Alir Pengolahan Eksterior Candi Sari

Penjelasan dari tahapan pengolahan eksterior Candi Sari pada penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut.

1. Pengolahan Fotogrametri Jarak Dekat

Pada pengolahan menggunakan akuisisi data fotogrametri jarak dekat terdapat dua wahana yang

berbeda saat dilakukan pengambilan foto Candi Sari yaitu dengan menggunakan wahana *drone* dan foto terestris. Tujuan dilakukannya pengambilan foto dengan wahana yang berbeda adalah untuk mendapatkan hasil yang maksimal pada saat pembentukan *mesh* model. Pada wahana *drone* digunakan kamera tipe FC330 dengan *focal length* 4 mm. Sedangkan untuk metode foto terestris menggunakan kamera Canon EOS 5 DS R dengan *focal length* 24 mm.

a. Pengolahan Menggunakan Data Wahana *Drone*

- i. *Align* Foto: Tujuan dilakukannya proses ini adalah untuk merapatkan titik-titik yang dibentuk dari kumpulan foto Candi Sari sehingga dapat diproses menjadi *point cloud*.
- ii. Georeferensi: Pada tahap ini dilakukan georeferensi foto ke dalam sistem koordinat WGS84 zona 49S. Georeferensi ini bertujuan untuk mengikatkan hasil olahan ke sistem koordinat Bumi serta menyeragamkan sistem koordinat antara olahan fotogrametri jarak dekat dengan TLS. Sehingga *point cloud* antara pengolahan fotogrametri jarak dekat dan TLS dapat tergabung. Pada georeferensi dilakukan pula cek koordinat *error*, apabila *error pixel* dan *error distance* dari hasil georeferensi memenuhi syarat kurang dari 1 pixel dan 5 cm maka dapat melanjutkan ke tahapan berikutnya. Apabila masih

belum maka perlu dilakukan georeferensi ulang terhadap foto.

- iii. *Dense Cloud*: Setelah melakukan georeferensi langkah berikutnya adalah melakukan pembuatan *dense cloud*. Proses ini merupakan perapatan kembali dari titik-titik *cloud* sehingga menjadi model. Pada penelitian ini proses *dense cloud* dibentuk dengan resolusi *medium* agar tidak memberatkan kinerja dari laptop atau komputer.

b. Pengolahan Menggunakan Data Foto Terestris

Sebelum dilakukannya *align* foto terlebih dahulu dibuat *chunck* baru untuk pemrosesan foto terrestrial.

- i. *Align* Foto
- ii. Georeferensi: Pada tahap ini dilakukan georeferensi foto ke dalam sistem koordinat WGS84 zona 49S. Georeferensi ini bertujuan untuk mengikatkan hasil olahan ke sistem koordinat Bumi serta menyeragamkan sistem koordinat antara olahan fotogrametri jarak dekat dengan TLS. Sehingga *point cloud* antara pengolahan menggunakan fotogrametri jarak dekat dan TLS dapat tergabung. Pada georeferensi dilakukan pula cek koordinat *error*, apabila *error pixel* dan *error distance* dari hasil georeferensi memenuhi syarat kurang dari 1 pixel dan 5 cm

maka dapat melanjutkan ke tahapan berikutnya. Apabila masih belum maka perlu dilakukan georeferensi ulang terhadap foto.

iii. *Dense Cloud*

c. Pengolahan Penggabungan Menggunakan Hasil Data Wahana *Drone* dan Foto Terestris

- i. *Align Chunk*: Tujuan dari proses ini adalah meregistrasi dua *chunk* yang akan dilakukan penggabungan. Sebelum melakukan *align chunk* pastikan terlebih dahulu *marker* pada *chunk* foto terrestrial memiliki nama *marker* dan sistem koordinat (WGS84 49S) yang sama dengan *chunk* wahana *drone*. Pada proses *align Chunk*, peneliti menggunakan metode *marker based*.
- ii. *Merge Chunk*: Setelah melakukan *align chunk* langkah berikutnya adalah *merge chunk*. Tujuan dari proses ini adalah untuk menggabungkan dua *chunk* yang telah dilakukan proses *align chunk* sebelumnya.
- iii. *Dense Cloud* Gabungan: Hasil dari *merge chunk* antara *chunk drone* dengan *chunk* foto terrestrial adalah *dense cloud* gabungan yang sebelumnya telah diolah dimasing-masing *chunk*.
- iv. *Drone* dan Foto Terestris *Chunk*: Selain menghasilkan *dense cloud*

gabungan, hasil proses *merge chunk* juga membentuk *chunk* baru yaitu gabungan antara pengolahan foto dengan wahana *drone* dan foto terestris.

- v. Ubah Format Data: Setelah *dense cloud* gabungan terbentuk langkah berikutnya adalah mengubah format data *dense cloud* menjadi (.e57) sehingga dapat di-*import* kedalam perangkat lunak *Cloudcompare* untuk pembuatan *mesh* model 3D Candi Sari.

2. Pengolahan *Terrestrial Laser Scanner* (TLS)

- a. *Point Cloud*: Hasil pengolahan TLS tersebut kemudian diekstrak menjadi *point clouds* yang masih perlu dilakukan proses registrasi dan georeferensi sebelum siap digabungkan dengan *point clouds* dari hasil pengolahan fotogrametri jarak dekat. Namun dalam penelitian ini proses registrasi telah dilakukan oleh tim KK-INSIG. Sehingga dalam penelitian ini dimulai dari proses georeferensi *point cloud* dengan menggunakan perangkat lunak *Cloudcompare*.
- b. *Subsample*: Sebelum dilakukannya proses georeferensi langkah yang perlu dilakukan adalah melakukan proses *subsample*. Proses ini bertujuan untuk memperkecil ukuran data *point cloud* teregistrasi yang besar agar meringankan kinerja dari komputer. Pada proses ini dilakukan perenggangan jarak antar *point cloud* dengan pengaturan

- tertentu sehingga ukuran data *point cloud* dapat mengecil.
- c. Georeferensi: Pada tahap ini georeferensi dilakukan agar data TLS terintegrasi dengan sistem koordinat WGS84 zona 49S. Georeferensi ini bertujuan untuk mengikatkan hasil olahan ke sistem koordinat Bumi serta menyeragamkan sistem koordinat antara olahan fotogrametri jarak dekat dengan TLS. Pada tahap ini dilakukan pula cek koordinat. Apabila memenuhi syarat *error* kurang dari 1 cm maka dapat melakukan proses selanjutnya. Apabila tidak memenuhi syarat maka perlu melakukan georeferensi ulang.
 - d. Segmentasi: Tahapan ini bertujuan untuk memisahkan antara *point cloud* interior dengan eksterior Candi Sari. Pemisahan *point cloud* ini bertujuan untuk memudahkan dalam proses tekstur dan penggabungan dengan hasil olahan data fotogrametri jarak dekat.
 - e. *Point Cloud* Eksterior: Merupakan hasil dari proses segmentasi.
 - f. *Point Cloud* Interior: Merupakan hasil dari proses segmentasi.
3. Pengolahan Model *Mesh* Gabungan Fotogrametri dan *Terrestrial Laser Scanner* (TLS)
 - a. Integrasi *Point Cloud*: Pada proses ini dilakukan integrasi antara *point cloud* fotogrametri jarak dekat dengan TLS. Data *point cloud* fotogrametri yang telah diubah formatnya menjadi format (.e57) kemudian di masukan kedalam perangkat lunak

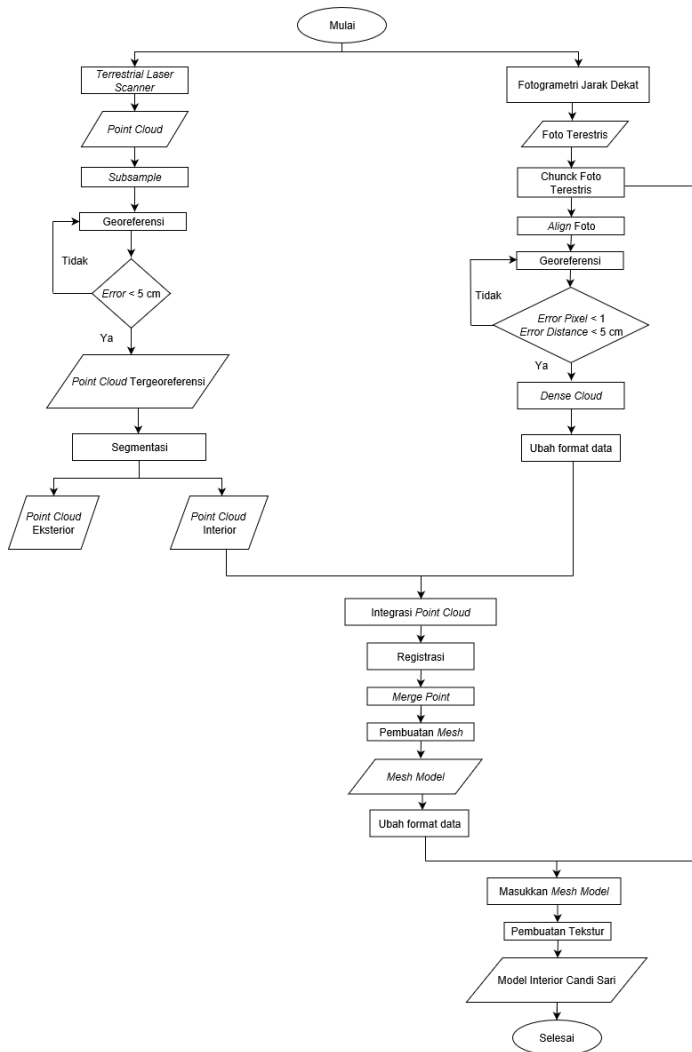
- Cloudcompare*. Setelah data fotogrametri telah masuk, data *point cloud* TLS dimasukan pula kedalam perangkat lunak *Cloudcompare* dengan file yang sama.
- b. Registrasi: Langkah berikutnya adalah melakukan registrasi dengan menggunakan algoritma *fine registration* atau ICP (*Iterative Closest Point*) antara hasil pengolahan fotogrametri dengan TLS. Acuan yang digunakan dalam melakukan proses registrasi ICP ini adalah data TLS hal ini dikarenakan pada data TLS dianggap memiliki geometri yang lebih baik dari fotogrametri. Hasil dari proses ini adalah nilai RMSe dari registrasi antara data fotogrametri dengan TLS.
 - c. *Merge Point*: Setelah dilakukannya registrasi langkah berikutnya adalah melakukan *merge point* antara *point cloud* data fotogrametri dengan TLS.
 - d. Pembuatan *Mesh*: Setelah melakukan *merge point* langkah berikutnya adalah melakukan pembuatan *mesh* terhadap *point cloud* gabungan tersebut. Algoritma dalam pembuatan *mesh* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Poisson Reconstruction*.
 - e. *Mesh Model*: Merupakan hasil dari pembuatan *mesh* yang dilakukan di perangkat lunak *Cloudcompare*.
 - f. Ubah Format Data: Setelah *mesh* terbentuk langkah berikutnya adalah mengubah format data *mesh* menjadi (.obj) sehingga dapat di-*import* kedalam perangkat lunak

pengolah foto udara untuk pembuatan tekstur model 3D Candi Sari.

4. Pengolahan Tekstur Gabungan Fotogrametri Jarak Dekat dan *Terrestrial Laser Scanner* (TLS)
 - a. Memasukan *Mesh Model*: Proses awal dalam pembuatan tekstur ini adalah memasukan model *mesh* 3D hasil pengolahan pada *Cloudcompare* kedalam perangkat lunak pengolah foto udara yang telah diubah format kedalam bentuk (.obj). Model *mesh* ini dimasukan kedalam *chunk* gabungan hasil olahan foto dengan wahana *drone* dan foto terestris agar terbentuk tekstur yang detail. Pastikan terlebih dahulu sistem koordinat model dengan *chunk* telah sama.
 - b. Pembuatan tekstur: Setelah memasukan model 3D *mesh* langkah berikutnya adalah melakukan proses tekstur pada *tools workflow* dalam perangkat lunak pengolah foto udara. Tujuan dilakukannya proses ini adalah untuk menghasilkan tekstur bangunan yang nyata seperti pada Candi Sari yang sebenarnya.
 - c. Model 3D Eksterior Candi Sari: Setelah proses pembuatan tekstur selesai maka terbentuklah model 3D eksterior Candi Sari.

3.3.2.2. Pengolahan Interior Candi Sari

Tahapan dalam pengolahan interior Candi Sari dapat ditunjukkan dalam Gambar 3.5. berikut ini.



Gambar 3.5. Diagram Alir Pengolahan Interior Candi Sari

Penjelasan dari tahapan pengolahan eksterior Candi Sari pada penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut.

1. Pengolahan Fotogrametri Jarak Dekat

Pada pengolahan interior akuisisi data fotogrametri jarak dekat menggunakan foto terestris. Pada metode foto terestris menggunakan kamera Canon EOS 5 DS R dengan *focal length* 24 mm.

- a. *Chunk* Foto Terestris: Sebelum dilakukannya *align* foto terlebih dahulu dibuat *chunk* baru untuk pemrosesan foto terrestrial
- b. *Align* Foto: Tujuan dilakukannya proses ini adalah untuk merapatkan titik-titik yang dibentuk dari kumpulan foto Candi Sari sehingga dapat diproses menjadi *point cloud*.
- c. Georeferensi: Pada tahap ini dilakukan georeferensi foto ke dalam sistem koordinat WGS84 zona 49S. Georeferensi ini bertujuan untuk mengikatkan hasil olahan ke sistem koordinat Bumi serta menyeragamkan sistem koordinat antara olahan fotogrametri jarak dekat dengan TLS. Sehingga *point cloud* antara pengolahan fotogrametri jarak dekat dan TLS dapat tergabung. Pada georeferensi dilakukan pula cek koordinat *error*, apabila *error pixel* dan *error distance* dari hasil georeferensi memenuhi syarat kurang dari 1 pixel dan 5 cm maka dapat melanjutkan ke tahapan berikutnya. Apabila masih belum maka perlu dilakukan georeferensi ulang terhadap foto.

- d. *Dense Cloud*: Setelah melakukan georeferensi langkah berikutnya adalah melakukan pembuatan *dense cloud*. Proses ini merupakan perapatan kembali dari titik-titik *cloud* sehingga menjadi model. Pada penelitian ini proses *dense cloud* dibentuk dengan resolusi *medium* agar tidak memberatkan kinerja dari laptop atau komputer.
 - e. Ubah Format Data: Setelah *dense cloud* interior terbentuk langkah berikutnya adalah mengubah format data *dense cloud* menjadi (.e57) sehingga dapat di-*import* kedalam perangkat lunak *Cloudcompare* untuk pembuatan *mesh* model 3D Candi Sari.
2. Pengolahan *Terrestrial Laser Scanner* (TLS)
 - a. *Point Cloud*: Hasil pengolahan TLS tersebut kemudian diekstrak menjadi *point clouds* yang masih perlu dilakukan proses registrasi dan georeferensi sebelum siap digabungkan dengan *point clouds* dari hasil pengolahan fotogrametri jarak dekat. Namun dalam penelitian ini proses registrasi telah dilakukan oleh tim KK-INSIG. Sehingga dalam penelitian ini dimulai dari proses georeferensi *point cloud* dengan menggunakan perangkat lunak *Cloudcompare*.
 - b. *Subsample*: Sebelum dilakukannya proses georeferensi langkah yang perlu dilakukan adalah melakukan proses *subsample*. Proses ini bertujuan untuk memperkecil ukuran data *point cloud* teregistrasi yang besar agar meringankan kinerja dari komputer. Pada

- proses ini dilakukan perenggangan jarak antar *point cloud* dengan pengaturan tertentu sehingga ukuran data *point cloud* dapat mengecil.
- c. Georeferensi: Pada tahap ini georeferensi dilakukan agar data TLS terintegrasi dengan sistem koordinat WGS84 zona 49S. Georeferensi ini bertujuan untuk mengikatkan hasil olahan ke sistem koordinat Bumi serta menyeragamkan sistem koordinat antara olahan fotogrametri jarak dekat dengan TLS. Pada tahap ini dilakukan pula cek koordinat. Apabila memenuhi syarat *error* kurang dari 1 cm maka dapat melakukan proses selanjutnya. Apabila tidak memenuhi syarat maka perlu melakukan georeferensi ulang.
 - d. Segmentasi: Tahapan ini bertujuan untuk memisahkan anatara *point cloud* interior dengan eksterior Candi Sari. Pemisahan *point cloud* ini bertujuan untuk memudahkan dalam proses tekstur dan penggabungan dengan hasil olahan data fotogrametri jarak dekat.
 - e. *Point Cloud* Eksterior: Merupakan hasil dari proses segmentasi.
 - f. *Point Cloud* Interior: Merupakan hasil dari proses segmentasi.
3. Pengolahan Model *Mesh* Gabungan Fotogrametri dan *Terrestrial Laser Scanner* (TLS)
- a. Integrasi *Point Cloud*: Pada proses ini dilakukan integrasi antara *point cloud* fotogrametri jarak dekat dengan TLS. Data *point cloud* fotogrametri yang telah diubah

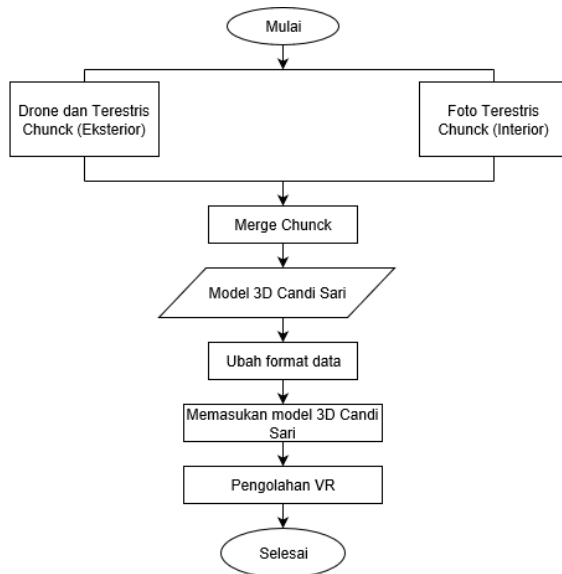
- formatnya menjadi format (.e57) kemudian di masukan kedalam perangkat lunak *Cloudcompare*. Setelah data fotogrametri telah masuk, data *point cloud* TLS dimasukan pula kedalam perangkat lunak *Cloudcompare* dengan file yang sama.
- b. Registrasi: Langkah berikutnya adalah melakukan registrasi dengan menggunakan algoritma *fine registration* atau ICP (*Iterative Closest Point*) antara hasil pengolahan fotogrametri dengan TLS. Acuan yang digunakan dalam melakukan proses registrasi ICP ini adalah data TLS hal ini dikarenakan pada data TLS dianggap memiliki geometri yang lebih baik dari fotogrametri. Hasil dari proses ini adalah nilai RMSe dari registrasi antara data fotogrametri dengan TLS.
 - c. *Merge Point*: Setelah dilakukannya registrasi langkah berikutnya adalah melakukan *merge point* antara *point cloud* data fotogrametri dengan TLS.
 - d. Pembuatan *Mesh*: Setelah melakukan *merge point* langkah berikutnya adalah melakukan pembuatan *mesh* terhadap *point cloud* gabungan tersebut. Algoritma dalam pembuatan *mesh* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Poisson Reconstruction*.
 - e. *Mesh Model*: Merupakan hasil dari pembuatan *mesh* yang dilakukan di perangkat lunak *Cloudcompare*.
 - f. Ubah Format Data: Setelah *mesh* terbentuk langkah berikutnya adalah mengubah format data *mesh* menjadi (.obj) sehingga

dapat di-*import* kedalam perangkat lunak pengolah foto udara untuk pembuatan tekstur model 3D Candi Sari.

4. Pengolahan Tekstur Gabungan Fotogrametri Jarak Dekat dan *Terrestrial Laser Scanner* (TLS)
 - a. Memasukan *Mesh Model*: Proses awal dalam pembuatan tekstur ini adalah memasukan model *mesh* 3D hasil pengolahan pada *Cloudcompare* kedalam perangkat lunak pengolah foto udara yang telah diubah format kedalam bentuk (.obj). Model *mesh* ini dimasukan kedalam *chunk* foto terestris hasil olahan foto terestris agar terbentuk tekstur yang detail. Pastikan terlebih dahulu sistem koordinat model dengan *chunk* telah sama.
 - b. Pembuatan tekstur: Setelah memasukan model 3D *mesh* langkah berikutnya adalah melakukan proses tekstur pada *tools workflow* dalam perangkat lunak pengolah foto udara. Tujuan dilakukannya proses ini adalah untuk menghasilkan tekstur bangunan yang nyata seperti pada Candi Sari yang sebenarnya.
 - c. Model 3D Interior Candi Sari: Setelah proses pembuatan tekstur selesai maka terbentuklah model 3D interior Candi Sari.

3.3.2.3. Pengolahan Gabungan

Tahapan dalam pengolahan gabungan fotogrametri dan TLS dapat ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 3.6. Diagram Alir Pengolahan Gabungan

Penjelasan dari tahapan pengolahan gabungan fotogrametri jarak dekat dan TLS pada penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut.

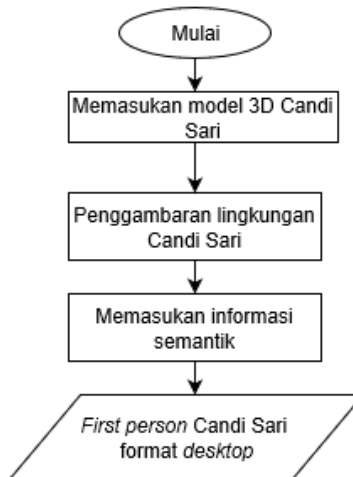
1. *Merge Chunk*: Pada proses ini model 3D Candi Sari pada *chunk* eksterior dan interior digabungkan dengan melakukan *merge chunk* yang berada di *tools workflow* pada perangkat lunak pengolah fotogrametri.
2. Model 3D Candi Sari: Hasil dari *merge chunk* ini adalah model 3D Candi Sari yang sudah tergabung antara model eksterior dan interior hasil pengolahan fotogrametri jarak dekat dan TLS.
3. Ubah Format Data: Setelah melakukan *merge chunk* maka akan menghasilkan model 3D Candi Sari dengan eksterior dan interior yang tergabung.

Model 3D Candi Sari ini kemudian diubah kedalam format data yang kompatibel dengan perangkat lunak pengolah *virtual reality* (.fbx).

4. Memasukan Model 3D Candi Sari: Model 3D Candi Sari yang telah diubah format datanya kemudian dimasukkan kedalam perangkat lunak pengolah *virtual reality*. Kemudian atur posisi dari model 3D Candi Sari.
5. Pengolahan *Virtual Reality* (VR): Setelah model dimasukkan ke dalam perangkat lunak pengolah *virtual reality* maka proses pengolahan *virtual reality* sudah dapat dilakukan.

3.3.2.4. Pengolahan VR-SIG

Tahapan dalam pengolahan *virtual reality* SIG (VR-SIG) pada penelitian ini dapat ditunjukkan pada gambar dibawah.



Gambar 3.7. Diagram Alir Pengolahan VR-SIG Candi Sari

Lanjutan Gambar 3.7.



Gambar 3.7. Diagram Alir Pengolahan VR-SIG Candi Sari

Penjelasan dari tahapan pengolahan VR-SIG Candi Sari pada penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut.

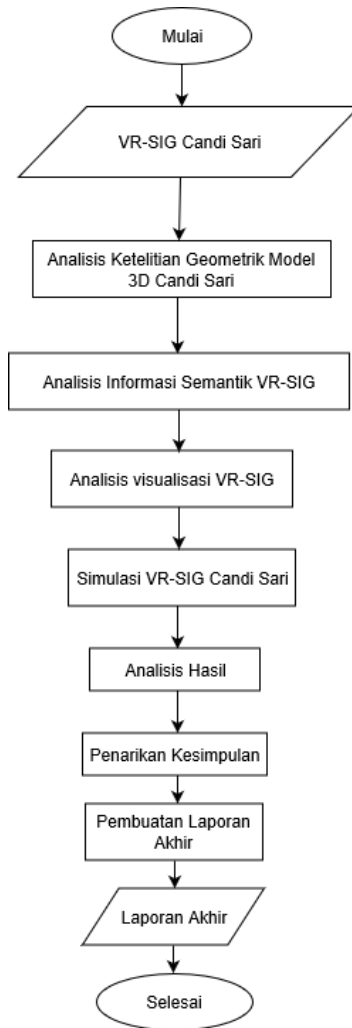
1. Pengolahan Pembuatan Model 3D Candi Sari di Perangkat Lunak Pengolah *Virtual Reality*
 - a. Memasukan Model 3D Candi Sari: Model 3D Candi Sari yang telah diubah format datanya kemudian dimasukan kedalam perangkat lunak pengolah *virtual reality*. Kemudian atur posisi dari model 3D Candi Sari.
 - b. Penggambaran Lingkungan Candi Sari: Pada penggambaran lingkungan Candi Sari ini dilakukan secara manual didalam perangkat lunak pengolah *virtual reality* yang disesuaikan dengan foto dokumentasi dari Candi Sari di lapangan.
 - c. Memasukan Informasi Semantik: Langkah berikutnya adalah memasukan informasi semantic dari Candi Sari. Adapun atribut atau informasi yang akan di-*input* adalah sebagai berikut.
 - i. Informasi historikal Candi Sari.
 - ii. Informasi arsitektural Candi Sari.
 - iii. Informasi fungsi bangunan Candi Sari.
 - iv. Informasi kondisi bangunan Candi Sari.
 - d. *First Person* Candi Sari Format *Desktop*: hasil akhir pada tahapan ini masih berupa *first person* pemodelan 3D Candi Sari dalam format *desktop*.

3. Pengolahan Pembuatan *Virtual Reality* di Perangkat Lunak Pengolah *Virtual Reality*
 - a. Pembuatan Video Candi Sari: Setelah menjadi *first person* Candi Sari dalam bentuk *desktop* langkah adalah membuat video dari pemodelan 3D Candi Sari tersebut. Pembuatan video ini dilakukan dengan menggunakan vitur yang terdapat pada perangkat lunak pengolah VR. Video ini dibentuk dari hasil pemotretan pada gambar pemodelan 3D Candi Sari kemudian disusun berurutan sehingga menjadi sebuah kesatuan dan berbentuk video. Pada pembuatan video ini juga dapat diatur kekontrasan cahaya, animasi bergerak dan efek lainnya sehingga hasil *rendering* video menjadi lebih bagus.
 - b. *Rendering* Video: Setelah video berhasil dibuat langkah berikutnya adalah melakukan *rendering* video. Tujuan dari *rendering* ini adalah untuk membuat hasil akhir dari model atau gambar yang masih mentah, terpisah, belum bersih, dan lain-lain. Hasil *rendering* video ini memiliki format data berupa (mp4).
 - c. Memasukan Video ke Ponsel: Setelah video berubah menjadi format (.mp4) langkah berikutnya adalah memasukan video kedalam ponsel. Memasukan video ini dapat dilakukan dengan menggunakan kabel USB atau *bluetooth*.
 - d. Pengunduhan Aplikasi *Virtual Reality*: Video yang telah dimasukan kedalam ponsel masih belum dapat digunakan menjadi *virtual reality*. Oleh karena itu

- perlu melakukan pengunduhan aplikasi *virtual reality* pada ponsel. Sehingga video pemodelan Candi Sari dapat dinikmati dalam format *virtual reality* yang terintegrasi dengan VR-BOX.
- e. Memasukan Video ke Aplikasi *Virtual Reality*: Setelah dilakukan pengunduhan aplikasi langkah berikutnya adalah memasukan video pemodelan 3D Candi Sari dari file penyimpanan ponsel ke aplikasi *virtual reality* tersebut.
 - f. Pengubahan Format Video menjadi Video Panorama 360°: Pada aplikasi *virtual reality* terdapat pilihan untuk tampilan *virtual reality* yang diinginkan. Untuk menghasilkan *virtual reality* yang dapat melihat lingkungan sekitar pada Candi Sari sesuai kehendak pengguna maka dapat diatur menjadi format video panorama 360°.
 - g. Integrasi Ponsel dengan VR-BOX: Setelah melakukan pengaturan video menjadi panorama 360° langkah berikutnya adalah mengintegrasikan ponsel ke *VR-BOX*. Proses integrasi ini hanya perlu melakukan pemasangan ponsel kedalam *VR-BOX*.
 - h. VR-SIG Candi Sari: Setelah terintegrasi antara ponsel dengan *VR-BOX*, pemodelan 3D Candi Sari sudah dapat dinikmati oleh pengguna dalam bentuk *virtual reality*. Pada VR-SIG di tahap ini masih belum dilakukan simulasi.

3.3.3. Tahap Analisis

Adapun diagram alir dari tahapan analisis penelitian ini dapat ditunjukkan dalam Gambar 3.8. berikut.



Gambar 3.8. Diagram Alir Tahapan Analisis Penelitian

Penjelasan dari tahapan analisis penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut.

1. Analisis Ketelitian Geometrik Model 3D Candi Sari: Analisis ketelitian geometri model 3D Candi Sari terdiri dari beberapa aspek analisis, yaitu:
 - a. Analisis geometrik model 3D Candi Sari berdasarkan konsep *CityGML*.
 - b. Analisis besar dan arah pergeseran model 3D Candi Sari.
 - c. Analisis perbandingan hasil ketelitian pemrosesan metode fotogrametri jarak dekat dengan hasil integrasi data *point clouds* dari metode fotogrametri jarak dekat dan TLS.
 - d. Analisis perbandingan hasil ketelitian model 3D Candi Sari dengan penelitian terdahulu yang serupa.
2. Analisis Informasi Semantik VR-SIG: Analisis yang dilakukan adalah menganalisis pemrosesan dari penyisipan informasi semantik seperti historikal, arsitektural, fungsi bangunan, dan kondisi bangunan dari Candi Sari yang dikaitkan dengan SIG.
3. Analisis Visualisasi: Analisis yang dilakukan adalah meneliti hasil visualisasi dari *virtual reality* Candi Sari seperti aspek tekstur, pencahayaan, dan bayangan.
4. Simulasi VR-SIG: Melakukan uji coba terhadap VR-SIG Candi Sari.
5. Analisis Hasil: Setelah mendapatkan hasil analisis maka dapat dilakukan analisis akhir. Analisis akhir ini dapat digunakan sebagai penarikan kesimpulan sehingga menjawab tujuan. Adapun detail dari substansi analisa hasil adalah sebagai berikut.
 - a. Berdasarkan analisis dapat mengetahui cara pembuatan model 3D Candi Sari sehingga menjadi VR-SIG dari integrasi data dengan metode fotogrametri jarak dekat dan TLS.

- b. Berdasarkan analisis dapat diketahui ketelitian geometrik dari model 3D Candi Sari berdasarkan konsep *CityGML*.
- c. Berdasarkan analisis dapat diketahui visualisasi yang dihasilkan pada pemodelan 3D Candi Sari di dalam *virtual reality*.

3.3.4. Tahap Akhir

1. Penarikan kesimpulan

Berdasarkan data, hasil dan analisis yang dilakukan maka akan diperoleh kesimpulan yang meliputi:

- a. Terbentuknya VR-SIG dari hasil pemodelan 3D dengan menggunakan integrasi data metode fotogrametri jarak dekat dan TLS.
- b. Analisis ketelitian geometrik pemodelan 3D berdasarkan konsep *CityGML* serta analisis besar dan arah pergeseran model 3D Candi Sari.
- c. Analisis visualisasi pada aspek tekstur, cahaya, dan warna serta analisis informasi semantik pada *virtual reality* SIG (VR-SIG).

2. Penyajian Hasil Penelitian

Penyajian hasil penelitian tugas akhir adalah (VR-SIG) *virtual reality* SIG dari Candi Sari yang sudah tersimulasi.

3. Pembuatan Laporan Akhir

Materi yang dikumpulkan mulai dari identifikasi masalah, studi literatur, hasil pengolahan data sampai dengan analisis dan penarikan kesimpulan dituliskan dalam laporan akhir.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pengolahan Fotogrametri Jarak Dekat

Pada hasil pengolahan fotogrametri jarak dekat terdapat dua pengolahan, yaitu pengolahan eksterior dan interior Candi Sari dari hasil gabungan wahana menggunakan *drone* dan foto terrestrial dengan GSD pengolahan wahana *drone* sebesar 7.84 mm per pixel dan GSD pengolahan gabungan menjadi 1.49 mm per pixel. Adapun ketelitian dari pengolahan menggunakan fotogrametri jarak dekat dapat dijabarkan sebagai berikut.

4.1.1. Hasil Eksterior Candi Sari Data Foto

Berikut dibawah ini adalah gambar 3D model hasil pengolahan eksterior Candi Sari menggunakan metode fotogrametri jarak dekat.



Gambar 4.1. Model 3D Eksterior Candi Sari Data Foto

4.1.1.1. GCP Eksterior Data Foto

Dibawah ini merupakan gambar dari persebaran titik GCP dan ICP yang disebar di lapangan.



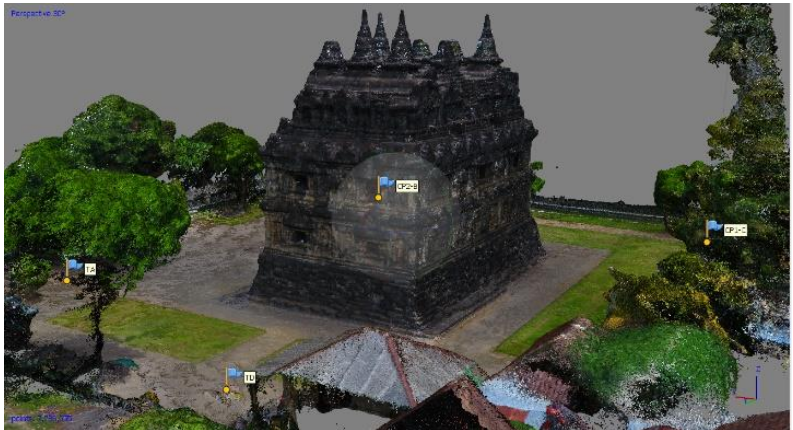
a.



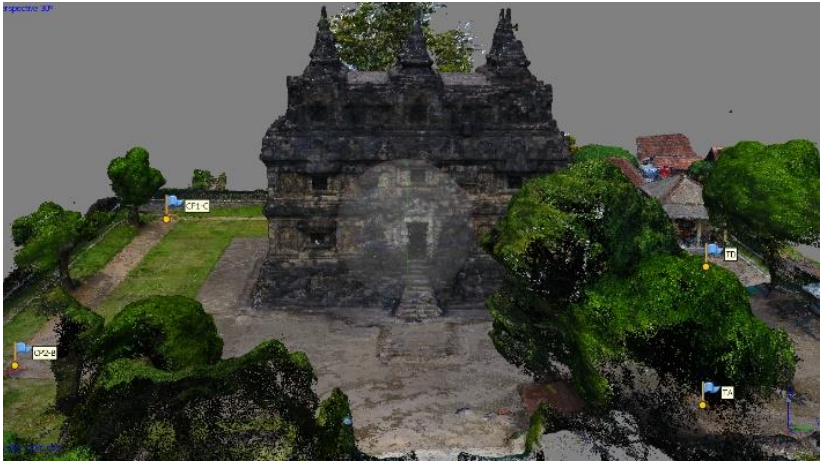
b.



c.



d.



e.

Gambar 4.2. a. Sebaran GCP Tampak Atas; b. Sebaran GCP Tampak Selatan; c. Sebaran GCP Tampak Utara; d. Sebaran GCP Tampak Timur; e. Sebaran GCP Tampak Barat

Sebelum membuat model 3D Candi Sari, perlu dilakukan georeferensi foto ke dalam sistem koordinat WGS84 zona 49S dengan menggunakan koordinat referensi yaitu GCP. Koordinat GCP untuk pengolahan fotogrametri jarak dekat didapatkan dari hasil pengamatan menggunakan GPS.

Berikut ini adalah daftar koordinat titik GCP Candi Sari dan RMSe GCP model 3D eksterior Candi Sari dari hasil pengolahan fotogrametri jarak dekat.

Tabel 4.1. Daftar Koordinat Titik GCP Foto

Titik	X (m)	Y (m)	Z (m)
TD	442023.615	9142052.390	163.926
CP1-C	442009.258	9142012.411	163.589
CP2-B	442039.488	9142011.767	163.899
TA	442043.703	9142044.459	163.556

Tabel 4.2. Hasil RMSe GCP Foto

No.	Titik	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)	Total Error (m)	Error Pixel (pix)
1	TD	0.011	-0.006	-0.048	0.050	0.395
2	CP1-C	0.006	-0.004	0.013	0.015	0.799
3	CP2-B	-0.016	0	-0.020	0.026	0.761
4	TA	0.009	0.016	0.037	0.041	0.479
Total Error		0.011	0.009	0.033	0.036	0.656

Berdasarkan nilai yang disajikan pada Tabel 4.2. di atas maka dapat diketahui nilai RMSe GCP untuk hasil pengolahan Candi Sari data fotogrametri jarak dekat adalah pada sumbu X sebesar 0.011 m, sumbu Y sebesar 0.009 m, dan sumbu Z sebesar 0.033 m. Kemudian RMSe dari total *error* pada CP1-C sebesar 0.015 m, CP2-B sebesar 0.026 m, TA sebesar 0.041 m, dan TD sebesar 0.050 m. Kemudian nilai RMSe dari pixel foto adalah sebesar 0.656 pixels dengan total RMSe dari kesalahan jarak adalah sebesar 0.036 m.

4.1.1.2. ICP Eksterior Data Foto

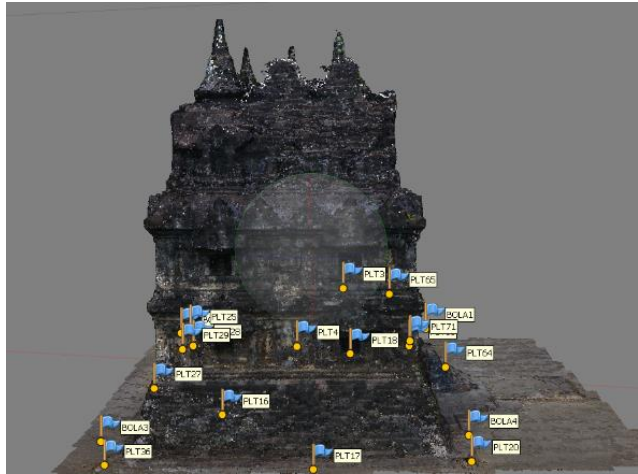
Setelah melakukan *markering* pada GCP Candi Sari, langkah berikutnya adalah melakukan *markering* pada ICP Candi Sari. Adapun sebaran ICP pada Candi Sari dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



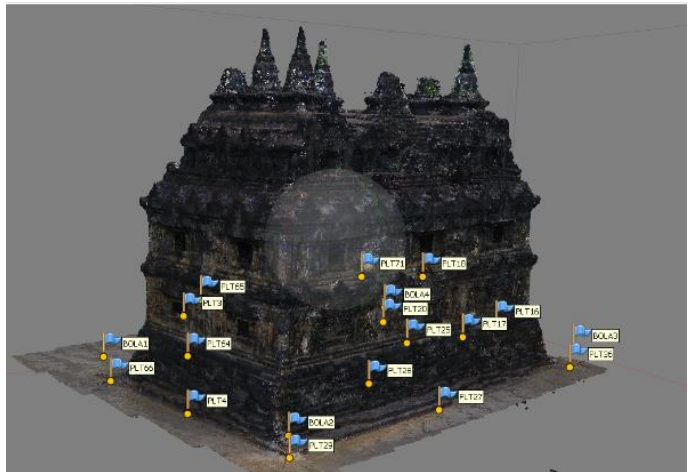
a.



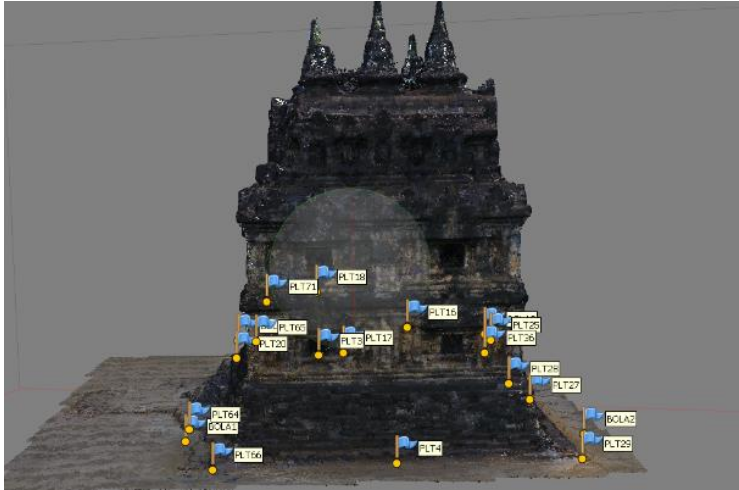
b.



C.



d.



e.

Gambar 4.3. a. Sebaran ICP Eksterior Tampak Atas; b. Sebaran ICP Eksterior Tampak Barat; c. Sebaran ICP Eksterior Tampak Utara; d. Sebaran ICP Eksterior Tampak Timur; e. Sebaran ICP Tampak Selatan

Koordinat ICP ini didapatkan dari hasil pengukuran dengan menggunakan *electronic total station* (ETS). Adapun daftar koordinat ICP adalah sebagai berikut.

Tabel 4.3. Daftar Koordinat Titik ICP Eksterior Foto

Titik	X (m)	Y (m)	Z (m)
BOLA2	442018.342	9142042.263	164.620
BOLA3	442018.065	9142021.929	164.632
BOLA4	442031.835	9142021.955	164.629
BOLA1	442032.592	9142041.966	164.785
PLT16	442022.540	9142022.815	165.320
PLT17	442025.997	9142021.236	163.654

Lanjutan Tabel 4.3.

Titik	X (m)	Y (m)	Z (m)
PLT18	442027.512	9142023.482	167.462
PLT20	442031.953	9142021.918	163.642
PLT25	442020.016	9142033.527	166.491
PLT27	442018.187	9142033.284	163.670
PLT28	442019.799	9142036.310	165.133
PLT29	442018.370	9142042.201	163.692
PLT36	442018.102	9142022.139	163.640
PLT64	442033.039	9142036.611	163.700
PLT65	442030.188	9142037.797	167.472
PLT66	442031.645	9142042.109	163.744
PLT71	442030.090	9142026.103	167.391
PLT3	442027.834	9142040.500	167.437
PLT4	442025.124	9142042.159	163.807

Berikut ini adalah RMSe dari ICP model 3D eksterior Candi Sari dari hasil pengolahan fotogrametri jarak dekat.

Tabel 4.4. Hasil RMSe ICP Eksterior Foto

No.	Titik	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)	Total Error (m)	Error Pixel (pix)
1	BOLA2	0.022	0.011	-0.005	0.025	0.419
2	BOLA3	0.019	-0.005	0.015	0.025	0.728
3	BOLA4	0.006	0.007	0.050	0.051	0.220
4	BOLA1	0.027	0.008	-0.039	0.049	0.379
5	PLT16	0.003	0.019	0.021	0.028	0.470
6	PLT17	-0.009	0.012	0.037	0.040	0.914

Lanjutan Tabel 4.4.

No.	Titik	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)	Total Error (m)	Error Pixel (pix)
7	PLT18	-0.022	0.010	0.031	0.039	0.360
8	PLT20	-0.020	0.002	0.046	0.050	0.774
9	PLT25	0.010	-0.004	0.006	0.013	0.340
10	PLT27	0.023	-0.003	0.004	0.024	0.707
11	PLT28	0.005	0	0.013	0.014	0.633
12	PLT29	0.035	0.001	-0.004	0.035	0.431
13	PLT36	0.021	0.029	0.006	0.036	0.798
14	PLT64	0.014	0	0.024	0.028	0.625
15	PLT65	-0.004	0.006	0.032	0.032	0.575
16	PLT66	0.046	0.011	-0.014	0.049	0.305
17	PLT71	-0.028	0.019	0.029	0.044	0.352
18	PLT3	-0.029	0.026	-0.009	0.040	0.669
19	PLT4	-0.002	0.025	-0.051	0.057	0.389
RMSe		0.022	0.013	0.028	0.038	0.578

Berdasarkan nilai yang disajikan pada Tabel 4.4. di atas maka dapat diketahui nilai RMSe ICP eksterior untuk hasil pengolahan Candi Sari data fotogrametri jarak dekat adalah pada sumbu X sebesar 0.022 m, sumbu Y sebesar 0.013 m, dan sumbu Z sebesar 0.028 m. Kemudian RMSe dari pixel foto adalah sebesar 0.578 pixels dengan total RMSe dari total *error* adalah sebesar 0.038 m.

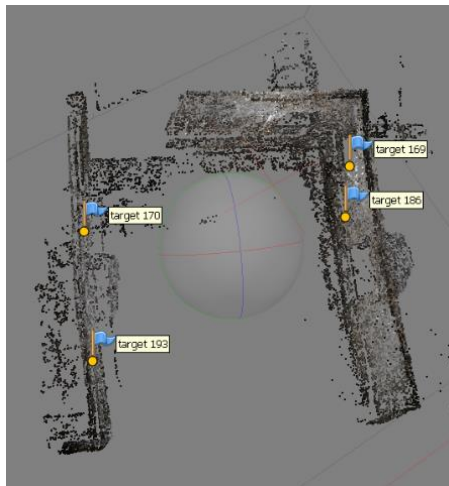
4.1.2. Hasil Interior Candi Sari Data Foto

Sebelum membuat model 3D Candi Sari, perlu dilakukan georeferensi foto ke dalam sistem koordinat WGS84 zona 49S. Pada interior Candi Sari hanya memiliki

koordinat ICP yang didapat dari hasil pengukuran *electronic total station* (ETS). Pemotretan interior Candi Sari dilakukan dengan foto terestris dengan menggunakan kamera Canon EOS 5 DS R.

4.1.2.1. ICP Interior Data Foto

Dibawah ini merupakan gambar dari persebaran titik ICP interior Candi Sari yang disebar di lapangan.



Gambar 4.4. Sebaran ICP Interior Candi Sari

Adapun daftar koordinat ICP dari interior Candi Sari adalah sebagai berikut.

Tabel 4.5. Daftar Koordinat ICP Interior Foto

Titik	X (m)	Y (m)	Z (m)
PLT365	442027.311	9142025.296	167.560
PLT367	442026.414	9142025.397	167.151
PLT369	442026.442	9142030.462	167.121
PLT373	442024.065	9142030.541	167.120

Berikut ini adalah RMSe dari ICP model 3D interior Candi Sari dari hasil pengolahan fotogrametri jarak dekat.

Tabel 4.6. Hasil RMSe Koordinat ICP Interior Foto

No.	Titik	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)	Total Error (m)	Error Pixel (pix)
1	PLT365	-0.002	0.001	0	0.003	0.190
2	PLT367	0.006	0.001	0.001	0.007	0.105
3	PLT369	-0.001	0.002	0.001	0.002	0.134
4	PLT373	0.009	0.003	0.001	0.010	0.132
RMSe		0.006	0.002	0.001	0.006	0.163

Berdasarkan nilai yang disajikan pada Tabel 4.6. di atas maka dapat diketahui nilai RMSe ICP interior untuk hasil pengolahan Candi Sari data fotogrametri jarak dekat adalah pada sumbu X sebesar 0.006 m, sumbu Y sebesar 0.002 m, dan sumbu Z sebesar 0.001 m. Kemudian RMSe dari pixel foto adalah sebesar 0.163 pixels dengan total RMSe dari total *error* adalah sebesar 0.006 m.

4.1.3. Hasil ICP Gabungan Data Foto

Berikut ini adalah hasil gabungan dari koordinat ICP data fotogrametri jarak dekat bagian eksterior dan interior.

Tabel 4.7. Hasil RMSe Koordinat ICP Gabungan Foto

No.	Titik	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)	Total Error (m)	Error Pixel (pix)
1	BOLA1	0.027	0.008	-0.039	0.049	0.379
2	BOLA2	0.022	0.011	-0.005	0.025	0.419

Lanjutan Tabel 4.7.

No.	Titik	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)	Total Error (m)	Error Pixel (pix)
3	BOLA3	0.019	-0.005	0.015	0.025	0.728
4	BOLA4	0.006	0.007	0.050	0.051	0.220
5	PLT3	-0.029	0.026	-0.009	0.040	0.669
6	PLT4	-0.002	0.025	-0.051	0.057	0.389
7	PLT16	0.003	0.019	0.021	0.028	0.470
8	PLT17	-0.009	0.012	0.037	0.040	0.914
9	PLT18	-0.022	0.010	0.031	0.039	0.360
10	PLT20	-0.020	0.002	0.046	0.050	0.774
11	PLT25	0.010	-0.004	0.006	0.013	0.340
12	PLT27	0.023	-0.003	0.004	0.024	0.707
13	PLT28	0.005	0.000	0.013	0.014	0.633
14	PLT29	0.035	0.001	-0.004	0.035	0.431
15	PLT36	0.021	0.029	0.006	0.036	0.798
16	PLT64	0.014	0.000	0.024	0.028	0.625
17	PLT65	-0.004	0.006	0.032	0.032	0.575
18	PLT66	0.046	0.011	-0.014	0.049	0.305
19	PLT71	-0.028	0.019	0.029	0.044	0.352
20	PLT365	-0.001	0.000	0.000	0.001	0.190
21	PLT367	-0.001	0.001	0.000	0.001	0.105
22	PLT369	0.000	-0.001	0.000	0.001	0.134
23	PLT373	0.001	-0.001	0.000	0.001	0.132
RMSe		0.020	0.012	0.025	0.034	0.489

Berdasarkan nilai yang disajikan pada Tabel 4.7. di atas maka dapat diketahui nilai RMSe ICP eksterior dan interior untuk hasil pengolahan Candi Sari data fotogrametri jarak dekat adalah pada sumbu X sebesar 0.020 m, sumbu Y

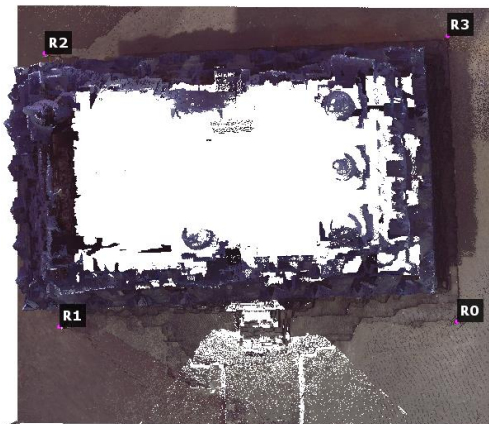
sebesar 0.012 m, dan sumbu Z sebesar 0.025 m. Kemudian RMSe dari pixel foto adalah sebesar 0.489 pixels dengan total RMSe dari kesalahan jarak adalah sebesar 0.034 m.

4.2. Hasil Pengolahan TLS

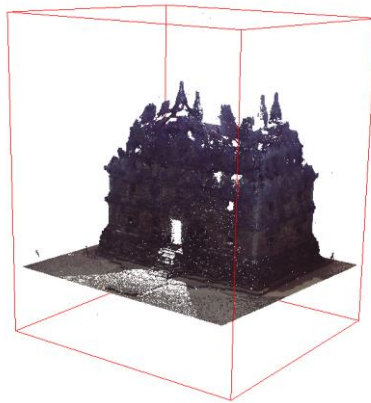
Hasil pengukuran menggunakan TLS berupa kumpulan titik (*point cloud*) yang dapat menjadi satu model utuh dari dengan cara menyatukan setiap hasil *scanworld* dari satu kali berdiri alat pada satu titik dengan hasil *scanworld* berdiri alat pada titik yang lain. Proses ini dinamakan dengan proses registrasi.

Pada penelitian ini data TLS sebelumnya telah dilakukan registrasi oleh tim lain dan belum dilakukan proses georeferensi. Sehingga pada penelitian ini lebih difokuskan pada proses georeferensi data TLS dengan menggunakan perangkat lunak *cloud compare*.

Pada penelitian ini *point cloud* TLS yang sudah di registrasi dilakukan proses *subsample* proses ini bertujuan untuk mengurangi kinerja laptop dikarenakan file hasil pengolahan TLS dapat memberatkan kinerja laptop. Kemudian dilakukan proses georeferensi. Berikut ini adalah gambar hasil pengolahan data dari TLS yang telah dilakukan georeferensi.



Gambar 4.5. Georeferensi *Point Cloud* TLS



Gambar 4.6. Model 3D TLS Tergeoreferensi

Setelah melakukan proses georeferensi, *point cloud* dari interior dan eksterior dipisahkan dengan menggunakan *tools* segmentasi dalam perangkat lunak *cloud compare*. Hal ini bertujuan agar lebih mempermudah dalam pewarnaan tekstur dari model 3D Candi Sari yang akan digabungkan dengan hasil pemrosesan fotogrametri jarak dekat. Adapun hasil dari proses segmentasi dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 4.7. Hasil Segmentasi *Point Cloud* Eksterior



Gambar 4.8. Hasil Segmentasi *Point Cloud* Interior

4.2.1. Georeferensi Data TLS

Pada proses georeferensi TLS menggunakan koordinat referensi dengan sistem koordinat WGS84 zona 49S dari bola atau *sphere*. Koordinat referensi ini merupakan hasil pengukuran menggunakan *electronic total station* (ETS). Terdapat 4 bola yang digunakan pada pengukuran ini. Berikut ini adalah gambar lokasi dari bola tersebut.



Gambar 4.9. Lokasi Penempatan Bola Candi Sari

Berikut ini adalah daftar koordinat kontrol bola dan RMSe untuk data TLS.

Tabel 4.8. Daftar Koordinat Titik Kontrol Bola TLS

Titik	X (m)	Y (m)	Z (m)
BOLA1	442032.592	9142041.966	164.785
BOLA2	442018.342	9142042.263	164.620
BOLA3	442018.065	9142021.929	164.632
BOLA4	442031.835	9142021.955	164.629

Dalam pengolahan georeferensi dengan menggunakan perangkat lunak *Cloudcompare* tidak memunculkan *error* pada X, Y, dan Z sehingga hanya diketahui *error* untuk jarak saja. Berikut ini nilai dari *error* setiap bola dan total RMSe-nya.

Tabel 4.9. Hasil RMSe Georeferensi Pengolahan TLS

Titik	Total <i>error distance</i> (m)
BOLA1	0.038
BOLA2	0.038
BOLA3	0.036
BOLA4	0.036
RMSe	0.037

Berdasarkan nilai yang disajikan pada Tabel 4.9. di atas maka dapat diketahui nilai RMSe dari georeferensi untuk hasil pengolahan Candi Sari data TLS adalah BOLA1 sebesar 0.038 m, BOLA2 sebesar 0.038 m, BOLA3 sebesar 0.036 m, dan BOLA4 sebesar 0.036 m. Total RMSe dari kesalahan jarak pada pengolahan ini adalah sebesar 0.037 m.

4.3. Integrasi Point Cloud TLS dan Fotogrametri

Pada proses ini dilakukan penggabungan antara *point cloud* fotogrametri jarak dekat dengan TLS. Pada proses ini dilakukan metode algoritma *fine registration* atau ICP (*Iterative Closest*

Point) pada perangkat lunak *Cloudcompare* dengan acuan koordinat data *point cloud* olahan TLS dan *overlap* sebesar 10%.



Gambar 4.10. Hasil *Point Cloud* Integrasi Eksterior



Gambar 4.11. Hasil *Point Cloud* Integrasi Interior

Pada hasil pengolahan ini diketahui hasil RMSe kesalahan jarak dari penggabungan *point cloud* fotogrametri jarak dekat dengan TLS.

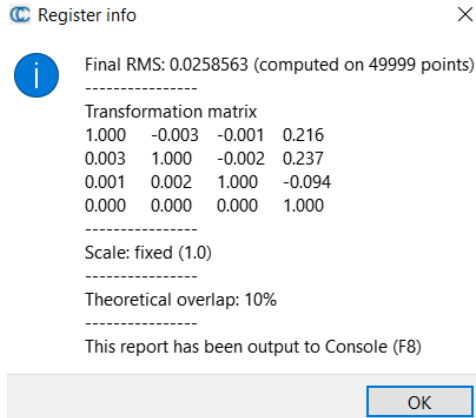
4.3.1. Integrasi Data Eksterior

Adapun daftar koordinat dan RMSe dari ICP eksterior pada pengolahan ini adalah sebagai berikut.

Tabel 4.10. Daftar Koordinat Titik Kontrol Integrasi Eksterior

Titik	X (m)	Y (m)	Z (m)
PLT16	442022.540	9142022.815	165.320
PLT17	442025.997	9142021.236	163.654
PLT18	442027.512	9142023.482	167.462
PLT20	442031.953	9142021.918	163.642
PLT25	442020.016	9142033.527	166.491
PLT27	442018.187	9142033.284	163.670
PLT28	442019.799	9142036.310	165.133
PLT29	442018.370	9142042.201	163.692
PLT36	442018.102	9142022.139	163.640
PLT64	442033.039	9142036.611	163.700
PLT65	442030.188	9142037.797	167.472
PLT66	442031.645	9142042.109	163.744
PLT71	442030.090	9142026.103	167.391
PLT3	442027.834	9142040.50	167.437
PLT4	442025.124	9142042.159	163.807

Untuk pengolahan integrasi eksterior Candi Sari pada pengolahan ini dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 4.12. Hasil Integrasi RMSe Eksterior

Dari hasil gambar diatas dapat diketahui RMSe antara data *point cloud* eksterior Candi Sari fotogrametri dengan TLS adalah sebesar 0.026 m.

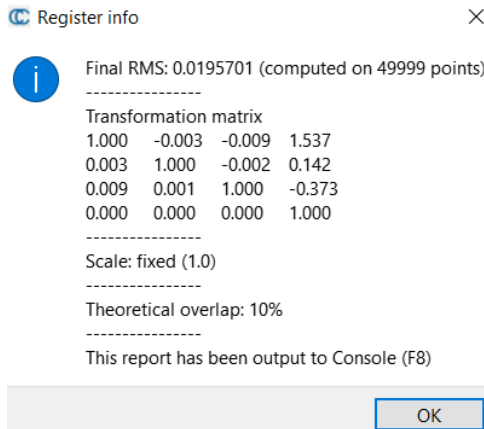
4.3.2. Integrasi Data Interior

Adapun daftar koordinat dan RMSe dari ICP interior pada pengolahan ini adalah sebagai berikut.

Tabel 4.11. Daftar Koordinat Titik Kontrol Integrasi Interior

Titik	X (m)	Y (m)	Z (m)
PLT365	442027.311	9142025.296	167.560
PLT367	442026.414	9142025.397	167.151
PLT369	442026.442	9142030.462	167.121
PLT373	442024.065	9142030.541	167.120

Untuk hasil dari proses integrasi interior Candi Sari dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 4.13. Hasil Integrasi RMSe Interior

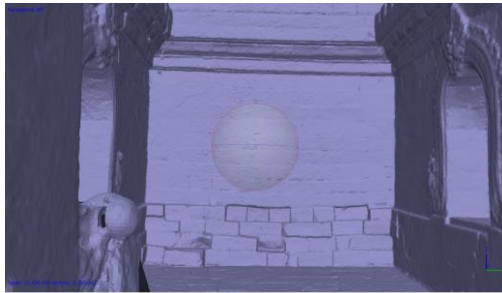
Dari hasil gambar diatas dapat diketahui RMSe antara data *point cloud* interior Candi Sari fotogrametri dengan TLS adalah sebesar 0.020 m.

4.4. Hasil Pengolahan Akhir Model 3D Candi Sari

Setelah melakukan proses georeferensi dan integrase pada fotogrametri dan TLS langkah berikutnya adalah melakukan penggabungan model. Pada proses penggabungan model, kedua model harus memiliki sistem referensi yang sama (WGS84 49S). Apabila sistem referensi tidak sama maka model tersebut tidak akan tergabung. Setelah memastikan model foto dan TLS menggunakan sistem referensi yang sama maka langkah berikutnya adalah memasukan model 3D dari hasil olahan menggunakan perangkat lunak *cloud compare* ke dalam *chunk* model foto pada perangkat lunak pengolah foto. Adapun hasil akhir dari penggabungan dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 4.14. Model *Mesh* 3D Candi Sari Eksterior



Gambar 4.15. Model *Mesh* 3D Candi Sari Interior



Gambar 4.16. Model 3D Bertekstur Bagian Eksterior



Gambar 4.17. Model 3D Bertekstur Bagian Interior

4.4.1. ICP Integrasi Eksterior

Setelah melakukan integrasi menggunakan metode *fine registration* maka dapat diperoleh koordinat ICP dari integrasi data *point cloud* TLS dan fotogrametri jarak dekat atau dapat dikatakan ICP akhir model 3D. Adapun hasil dari RMSe tersebut dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.12. Hasil RMSe ICP Integrasi Model 3D Eksterior

No.	Titik	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)	Total Error (m)
1	PLT16	-0.002	-0.016	-0.002	0.022
2	PLT17	0.008	-0.026	0.026	0.036
3	PLT18	0.030	0.039	-0.005	0.049
4	PLT20	0.000	-0.003	-0.003	0.018
5	PLT25	-0.012	-0.001	0.001	0.027
6	PLT27	0.026	0.002	-0.035	0.028
7	PLT28	0.024	0.002	0.001	0.027
8	PLT29	0.047	-0.006	-0.045	0.041
9	PLT36	-0.023	0.006	0.007	0.034
10	PLT64	0.000	-0.007	0.002	0.014

Lanjutan Tabel 4.12.

No.	Titik	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)	Total Error (m)
11	PLT65	-0.007	0.035	-0.005	0.050
12	PLT66	-0.028	-0.013	-0.011	0.027
13	PLT71	-0.025	-0.001	-0.007	0.019
14	PLT3	-0.010	-0.096	-0.027	0.080
15	PLT4	-0.002	-0.042	-0.006	0.024
RMSe		0.021	0.032	0.018	0.037

Berdasarkan nilai yang disajikan pada Tabel 4.12. di atas maka dapat diketahui nilai RMSe ICP integrasi eksterior untuk hasil pengolahan antara data fotogrametri dengan TLS adalah pada sumbu X sebesar 0.021 m, sumbu Y sebesar 0.032 m, dan sumbu Z sebesar 0.018 m. Besar dari RMSe total *error* pada pengolahan ini adalah sebesar 0.037 m.

4.4.2. ICP Integrasi Interior

Adapun hasil ICP integrasi data TLS dan fotogrametri jarak dekat untuk bagian interior dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.13. Hasil RMSe ICP Integrasi Model 3D Interior

No.	Titik	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)	Total Error (m)
1	PLT365	0.002	0.036	0.000	0.007
2	PLT367	0.004	0.032	0.016	0.008
3	PLT369	-0.004	0.021	0.016	0.010
4	PLT373	0.002	0.038	0.013	0.010
RMSe		0.003	0.032	0.013	0.009

Berdasarkan nilai yang disajikan pada Tabel 4.13. di atas maka dapat diketahui nilai RMSe ICP integrasi interior untuk hasil pengolahan antara data fotogrametri dengan TLS

adalah pada sumbu X sebesar 0.003 m, sumbu Y sebesar 0.032 m, dan sumbu Z sebesar 0.013 m. Besar dari RMSe total *error* pada pengolahan ini adalah sebesar 0.009 m.

4.4.3. ICP Integrasi Eksterior dan Interior

Nilai RMSe dari penggabungan ICP integrasi antara eksterior dan interior dari model 3D Candi Sari dapat ditunjukkan pada tabel berikut ini.

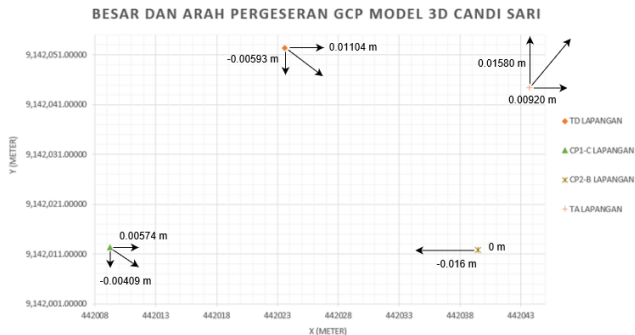
Tabel 4.14. Hasil RMSe ICP Integrasi Model 3D Gabungan

No.	Titik	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)	Total Error (m)
1	PLT16	-0.002	-0.016	-0.002	0.022
2	PLT17	0.008	-0.026	0.026	0.036
3	PLT18	0.030	0.039	-0.005	0.049
4	PLT20	0.000	-0.003	-0.003	0.018
5	PLT25	-0.012	-0.001	0.001	0.027
6	PLT27	0.026	0.002	-0.035	0.028
7	PLT28	0.024	0.002	0.001	0.027
8	PLT29	0.047	-0.006	-0.045	0.041
9	PLT36	-0.023	0.006	0.007	0.034
10	PLT64	0.000	-0.007	0.002	0.014
11	PLT65	-0.007	0.035	-0.005	0.050
12	PLT66	-0.028	-0.013	-0.011	0.027
13	PLT71	-0.025	-0.001	-0.007	0.019
14	PLT3	-0.010	-0.096	-0.027	0.080
15	PLT4	-0.002	-0.042	-0.006	0.024
16	PLT365	0.002	0.036	0.000	0.007
17	PLT367	0.004	0.032	0.016	0.008
18	PLT369	-0.004	0.021	0.016	0.010
19	PLT373	0.002	0.038	0.013	0.010
RMSe		0.019	0.032	0.017	0.033

Berdasarkan nilai yang disajikan pada Tabel 4.14. di atas maka dapat diketahui nilai RMSe ICP integrasi eksterior dan interior untuk hasil pengolahan antara data fotogrametri dengan TLS adalah pada sumbu X sebesar 0.019 m, sumbu Y sebesar 0.032 m, dan sumbu Z sebesar 0.017 m. Besar dari RMSe total *error* pada pengolahan ini adalah sebesar 0.033 m.

4.4.4. Besar dan Arah Pergeseran Model 3D

Berdasarkan hasil RMSe GCP dari pengolahan fotogrametri dan ICP dari hasil integrasi metode fotogrametri dengan TLS yang didapatkan, besar dan arah pergeseran dari model 3D Candi Sari ini dapat dilihat berdasarkan arah resultan dari masing-masing *error* sumbu X, Y, dan Z GCP dan ICP integrasi yang masing-masing ditunjukkan pada Tabel 4.2. dan Tabel 4.14. Pada pengeplotan besar dan arah pergeseran pada model 3D ini titik yang menjadi acuan adalah koordinat hasil pengukuran lapangan. Adapun besar dan arah pergeseran pada GCP model 3D Candi Sari dapat ditunjukkan pada Gambar 4.18. berikut ini.

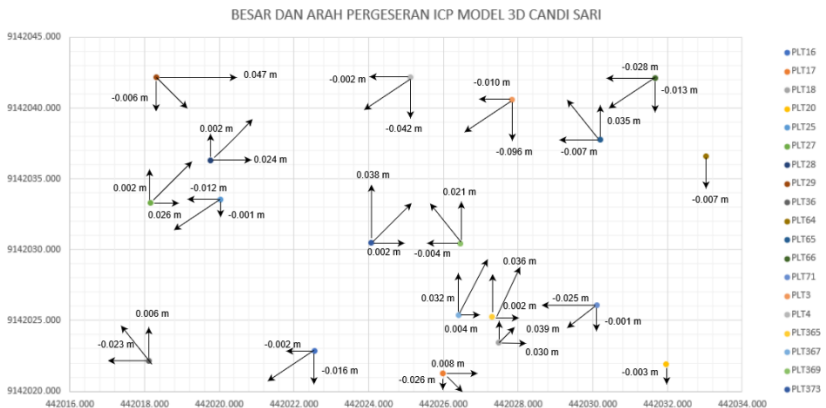


Gambar 4.18. Arah Resultan Pergeseran GCP Model 3D

Berdasarkan Gambar 4.18. besar dan arah resultan dari kesalahan sumbu X dan Y untuk GCP model 3D Candi Sari memiliki arah yang tidak beraturan. Kemudian untuk besar

error sumbu X terbesar sebesar 1.6 cm dengan arah vektor negatif dan *error* sumbu Y terbesar sebesar 1.6 cm dengan arah vektor positif. Untuk besar kesalahan pada sumbu Z dapat dilihat pada nilai total RMSe sumbu Z di Tabel 4.2. sebesar 0.033 m lebih besar dua kali lipat dibandingkan dengan total RMSe pada sumbu X dan Y. Besar *error* terbesar pada sumbu Z adalah pada titik TD sebesar 4.8 cm dengan arah vektor negatif.

Berikut ini adalah besar dan arah pergeseran pada ICP integrasi model 3D Candi Sari hasil integrasi antara data fotogrametri dengan TLS ditunjukkan pada Gambar 4.19. berikut ini.



Gambar 4.19. Arah Resultan Pergeseran ICP Model 3D

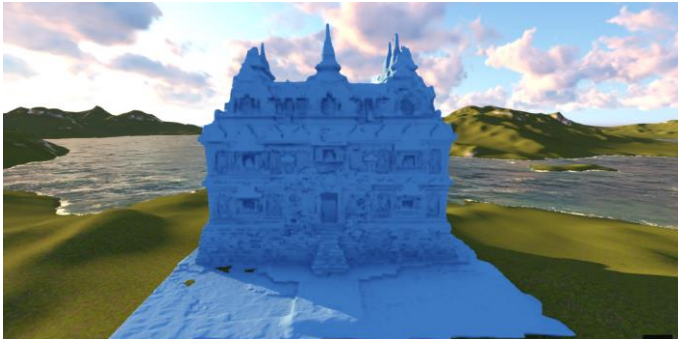
Berdasarkan Gambar 4.19. besar dan arah resultan dari kesalahan sumbu X dan Y untuk ICP integrasi model 3D Candi Sari memiliki arah yang tidak beraturan. Kemudian untuk besar *error* sumbu X terbesar sebesar 4.7 cm dengan arah vektor positif dan *error* sumbu Y terbesar sebesar 9.6 cm dengan arah vektor negatif. Untuk besar kesalahan pada sumbu Z dapat dilihat pada nilai total RMSe sumbu Z di Tabel 4.13. sebesar 0.017 m. Besar *error* terbesar pada sumbu Z adalah pada titik PLT29 sebesar 4.5 cm dengan arah vektor negatif.

4.5. Hasil Pengolahan Data *Virtual Reality* (VR)

Setelah itu lakukan pengolahan pemodelan 3D Candi Sari dengan menggunakan metode fotogrametri jarak dekat dan TLS langkah berikutnya adalah membuat *virtual reality* dari Candi Sari. Adapun hasil dari proses pembuatan *virtual reality* adalah sebagai berikut.

4.5.1. Hasil Penyisipan Model 3D Candi Sari

Sebelum melakukan penggambaran lingkungan sekitar dari Candi Sari langkah pertama adalah menyisipkan atau *import* hasil model 3D eksterior dan interior Candi Sari kedalam perangkat lunak pengolah *virtual reality*. Adapun format data yang kompatibel dengan perangkat lunak tersebut adalah (.fbx). Berikut ini adalah gambar hasil *import* objek 3D Candi Sari.



Gambar 4.20. Hasil Penyisipan Model 3D Candi Sari

4.5.2. Hasil Penggambaran Lingkungan Candi

Setelah melakukan proses pemasukan objek 3D Candi Sari langkah berikutnya adalah penggambaran lingkungan sekitar pada Candi Sari yang dilakukan dengan melihat foto dokumentasi dari keadaan sekitar Candi Sari. Berikut ini adalah hasil dari penggambaran lingkungan sekitar Candi Sari adalah sebagai berikut.



Gambar 4.21. Penggambaran Lingkungan Tampak Atas



Gambar 4.22. Penggambaran Lingkungan Tampak Depan

4.5.3. Hasil Penyisipan Informasi Candi

Setelah melakukan penggambaran lingkungan sekitar pada Candi Sari langkah berikutnya adalah proses penyisipan atau *import* informasi semantik dari Candi Sari. Adapun informasi yang disisipkan adalah informasi mengenai historikal, arsitektural, fungsi bangunan, dan kondisi pada bangunan Candi Sari. Hasil pengolahan tersebut dapat ditunjukkan pada gambar-gambar dibawah ini.



Gambar 4.23. Penyisipan Informasi Semantik



Gambar 4.24. Penyisipan Informasi Historikal



Gambar 4.25. Penyisipan Informasi Fungsi Bangunan



Gambar 4.26. Penyisipan Informasi Kondisi Bangunan



Gambar 4.27. Penyisipan Informasi Arsitektural

4.5.4. Hasil Pembangunan *Virtual Reality*

Setelah penggambaran lingkungan sekitar, pemasukan objek 3D, dan penyisipan informasi semantik dari Candi Sari selesai dilakukan langkah berikutnya adalah membuat *virtual reality* (VR) dari Candi Sari tersebut. Dalam pengolahan menjadi *virtual reality* ini. Proses pembangunan *virtual reality* diawali dengan membuat video dari hasil pemodelan 3D Candi Sari. Pembuatan video ini diawali dengan melakukan penangkapan gambar hasil model 3D Candi Sari dari beberapa sisi kemudian dilakukan penyatuan sehingga menjadi video.



Gambar 4.28. Pengolahan Video *Virtual Reality* Model 3D

Setelah melakukan pembuatan video, video VR-SIG tersebut dilakukan *editing* dengan penambahan filter cahaya, pergerakan objek, dan bayangan sehingga hasil *rendering* yang didapatkan terlihat nyata. Adapun hasil *rendering* video pada VR-SIG ini dapat ditunjukkan pada Gambar 4.26. berikut ini.



Gambar 4.29. Hasil *Rendering* Video VR-SIG Eksterior



Gambar 4.30. Hasil *Rendering* Video VR-SIG Interior

4.6. Hasil VR-SIG Candi Sari

Video VR-SIG Candi Sari yang telah ter-*rendering* dapat dimasukkan kedalam ponsel untuk dapat diintegrasikan dengan *VR-BOX*. Sebelum dilakukan integrasi antara ponsel dengan *VR-BOX* terlebih dahulu mengunduh aplikasi pemutar VR pada ponsel. Kemudian format video VR-SIG Candi Sari diubah menjadi bentuk video 360°. Adapun tampilan VR-SIG Candi Sari dalam bentuk video 360° dapat ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 4.31. Hasil Video 360° VR-SIG

Setelah mengubah format video VR-SIG Candi Sari menjadi video 360° maka VR-SIG sudah dapat dihubungkan dan digunakan dengan *VR-BOX*.

4.7. Analisis Ketelitian Geometri Objek 3 Dimensi

Berdasarkan konsep model bangunan CityGML (Fen dan Meng 2009), Candi Sari yang dimodelkan dengan menggunakan data integrasi fotogrametri jarak dekat dan TLS dalam penelitian ini termasuk kedalam *level of detail* (LoD) 4. Hal ini dikarenakan oleh beberapa aspek berikut.

1. Objek bangunan yang divisualisasikan menjadi model 3D sudah dapat menampilkan bagian luar bangunan (eksterior) dan bagian dalam bangunan (interior) dari Candi Sari.
2. Struktur bangunan sudah sesuai dengan objek aslinya.

Untuk menganalisis geometri model tiga dimensi Candi Sari, nilai RMSe dari GCP yang diperoleh dari hasil pengolahan fotogrametri dan RMSe dari ICP yang diperoleh dari hasil pengolahan integrasi data fotogrametri jarak dekat dan TLS digunakan sebagai variabel pembandingan ketelitian model.

Berdasarkan pada Tabel 4.2. diketahui nilai RMSe GCP pada hasil pengolahan sumbu X sebesar 0.011 m, sumbu Y sebesar 0.009 m, dan sumbu Z sebesar 0.033 m dengan total RMSe sebesar 0.036 m. Kemudian berdasarkan Tabel 4.14. Nilai RMSe dari ICP model Candi Sari hasil integrasi data fotogrametri dan TLS gabungan dari bagian eksterior dan interior yang terdapat pada adalah sumbu X sebesar 0.019 m, sumbu Y sebesar 0.032 m, dan sumbu Z sebesar 0.017 m dengan total RMSe sebesar 0.033 m.

Pada penelitian ini ditampilkan model 3D Candi Sari dengan model bangunan interior dan eksterior. Berdasarkan Konsep model bangunan menurut *CityGML* (Fen dan Meng 2009), untuk visualisasi model bangunan dengan LoD 4 dikatakan baik jika memiliki nilai RMSe kurang dari 0.2 m. Berdasarkan pernyataan tersebut dan merujuk pada hasil olahan data model 3D Candi Sari memiliki nilai RMSe GCP baik dari sumbu X, Y, dan Z adalah sudah memenuhi ketentuan konsep model bangunan *CityGML* karena nilai RMSe kurang dari 0.2 m. Sedangkan untuk hasil

RMSe ICP baik dari sumbu X, Y, dan Z juga sudah memenuhi ketentuan konsep bangunan *CityGML* hal ini dikarenakan nilai RMSe kurang dari 0.2 m.

Pada hasil pemodelan 3D Candi Sari gabungan antara bagian eksterior dan interior menggunakan metode fotogrametri dapat dilihat pada Tabel 4.7. diketahui nilai RMSe ICP total kesalahan adalah sebesar 0.034 m dan untuk RMSe pada tiap sumbu X, Y, dan Z adalah sebesar 0.20 m, 0.012 m, dan 0.025 m. Pada hasil pemodelan 3D Candi Sari integrasi antara metode fotogrametri dan TLS pada gabungan bagian eksterior dan interior yang dapat dilihat pada Tabel 4.14. diketahui nilai RMSe ICP total kesalahan adalah sebesar 0.033 m dan untuk RMSe pada tiap sumbu X, Y, dan Z adalah sebesar 0.19 m, 0.032 m, 0.017 m. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan data TLS pada hasil pengolahan fotogrametri dapat mengurangi nilai *error*. Pada sumbu X dan Z terjadi pengurangan nilai *error*. Namun pada sumbu Y nilai *error* yang didapat dari hasil integrasi ini meningkat. Sehingga penambahan data TLS dapat berpengaruh baik untuk nilai ketelitian geometri objek 3D tetapi metode integrasi antara fotogrametri dan TLS ini tidak dapat meningkatkan nilai ketelitian secara signifikan.

Dilihat dari Tabel 4.4. pengolahan fotogrametri bagian eksterior memiliki nilai RMSe ICP dari setiap sumbu X, Y, dan Z adalah sebesar 0.022 m, 0.013 m, dan 0.028 m. Bila dibandingkan dengan penelitian terdahulu yang serupa nilai RMSe ICP dari setiap sumbu dapat dikatakan baik karena pada penelitian yang telah dilakukan dengan studi kasus Candi Wringinlawang (Tunnisa dan Cahyono, 2017) nilai RMse dari sumbu X, Y, dan Z adalah sebesar 0.042 m, 0.047 m, dan 0.048 m. Namun jika dibandingkan dengan penelitian pemodelan 3D menggunakan metode fotogrametri pada Candi Jawi (Mulyono dkk, 2018) dengan nilai RMse dari sumbu X, Y, dan Z adalah sebesar 0.017 m, 0.017 m, dan 0.018 m hasil RMSe metode fotogrametri pada penelitian ini belum dapat dikatakan lebih baik. Perbedaan ketelitian dari metode ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti ukuran objek

yang dimodelkan, perambatan kesalahan hasil pengukuran dari titik kontrol, dan resolusi spasial dari foto tersebut.

Berdasarkan pada hasil nilai RMSe ICP integrasi antara metode fotogrametri dan TLS bagian eksterior dengan menggunakan metode *fine registration* yang terdapat pada Tabel 4.12. dapat dilihat RMSe dari masing-masing sumbu X, Y, dan Z adalah sebesar 0.021 m, 0.032 m, dan 0.018 m. Jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu yang serupa yaitu penelitian integrasi data fotogrametri dan TLS pada bangunan warisan budaya (Moussa, 2014) dengan metode registrasi menggunakan *accurate space resection* hasil dari RMSe ICP pada sumbu X, Y, dan Z adalah sebesar 0.059 m, 0.042 m, dan 0.032 m. Hal ini menunjukkan bahwa pada penelitian ini sudah dapat dikatakan baik, dikarenakan penelitian ini memiliki hasil RMSe ICP integrasi yang lebih kecil dari pada penelitian integrasi dengan menggunakan registrasi metode *accurate space resection*. Namun, apabila dibandingkan dengan ICP integrasi metode registrasi menggunakan SfM memiliki nilai RMSe tiap sumbu X, Y, dan Z adalah sebesar 0.014 m, 0.029 m, dan 0.012 m. Kemudian dengan metode registrasi menggunakan relasi geometrik dari *keypoints* memiliki nilai RMSe tiap sumbu X, Y, dan Z adalah sebesar 0.02 m, 0.005 m, dan 0.005 m. Sehingga dapat ditunjukkan bahwa pada penelitian ini masih belum dikatakan lebih baik karena pada penelitian ini masih memiliki RMSe yang lebih besar dibandingkan dengan dua metode tersebut. Perbedaan ketelitian dari hasil ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor yaitu pergeseran-pergeseran akibat dari proses registrasi sebelumnya dan perbedaan metode yang digunakan saat proses registrasi.

4.8. Analisis Besar dan Arah Pergeseran Model 3D

Dalam pemodelan 3D Candi Sari terdapat pergeseran titik GCP dan ICP integrasi antara pengukuran dengan pengolahan. Pergeseran titik ini dapat dilihat berdasarkan besar dan arah resultan dari *error* tiap titik GCP dan ICP pada sumbu X, Y, dan Z. Pada pengeplotan besar dan arah pergeseran pada model 3D ini

titik yang menjadi acuan adalah koordinat hasil pengukuran yang terdapat pada Tabel 4.1. untuk GCP kemudian Tabel 4.3. dan Tabel 4.5. untuk ICP model 3D Candi Sari.

Berdasarkan hasil pengeplotan resultan besar dan arah pergeseran GCP Candi Sari pada Gambar 4.18. dapat diketahui bahwa nilai *error* sumbu X terbesar adalah CP2-B sebesar 1.6 cm dengan arah vektor negatif dan *error* sumbu Y terbesar adalah TA sebesar 1.6 cm dengan arah vektor positif. Untuk besar kesalahan pada sumbu Z dapat dilihat pada nilai RMSe di Tabel 4.11. sebesar 0.033 m lebih besar dua kali lipat dibandingkan dengan RMSe pada sumbu X dan Y. Besar *error* terbesar pada sumbu Z adalah pada titik TD sebesar 4.8 cm dengan arah vektor negatif. Berdasarkan dari arah resultan dapat dikatakan pergeseran titik GCP pada hasil pengolahan dikarenakan oleh kesalahan bukan sistematis. Hal ini dikarenakan arah dari resultan pergeseran tidak beraturan.

Sedangkan berdasarkan hasil pengeplotan besar dan arah resultan pergeseran ICP integrasi pada Candi Sari di Gambar 4.19. dapat diketahui bahwa nilai *error* sumbu X terbesar adalah PLT29 sebesar 4.7 cm dengan arah vektor positif dan *error* sumbu Y terbesar adalah PLT3 sebesar 9.6 cm dengan arah vektor negatif. Untuk besar kesalahan pada sumbu Z dapat dilihat pada nilai RMSe di Tabel 4.14. sebesar 0.017 m. Besar *error* terbesar pada sumbu Z adalah pada titik PLT29 sebesar 4.5 cm dengan arah vektor negatif. Berdasarkan dari arah resultan dapat dikatakan pergeseran titik ICP pada hasil pengolahan dikarenakan oleh kesalahan bukan sistematis. Hal ini dikarenakan arah dari resultan pergeseran tidak beraturan.

4.9. Analisis Informasi Semantik Candi Sari

Peran SIG dalam penelitian ini terdapat pada penyisipan model 3D dan informasi semantik dari Candi Sari. Adapun SIG yang terdapat di VR-SIG adalah model 3D Candi Sari yang bersifat spasial dan informasi semantik seperti historikal, arsitektural, fungsi bangunan, dan kondisi bangunan yang bersifat non-spasial.

Proses penyisipan informasi semantik pada VR-SIG menggunakan perangkat lunak pengolah *virtual reality*.

Proses penyisipan informasi dengan perangkat lunak ini menggunakan prinsip *model text* yaitu elemen 3D berbasis *work plane* yang dapat digunakan untuk pemberian huruf pada bangunan dan lingkungan sekitarnya (Revit, 2018). Sehingga peneliti dapat secara langsung menyisipkan informasi mengenai historikal, arsitektural, fungsi bangunan, dan kondisi bangunan dari Candi Sari tanpa terlebih dahulu menyusun dan membuat *database*.









4.10. Analisis Visualisasi VR-SIG

Dalam pembuatan visualisasi objek 3D dibuat agar dapat menggambarkan kondisi dari wilayah tersebut. Oleh karena itu perlu dilakukan perbandingan antara keadaan sesungguhnya yang berasal dari foto dokumentasi wilayah dan bagaimana visualisasi dari kawasan wilayah tersebut. Adapun aspek perbandingan visualisasi ini berdasarkan tekstur, warna, dan pencahayaan.







Tabel 4.15. Perbandingan Visualisasi VR-SIG Eksterior

Perbandingan	Kondisi Nyata	Visualisasi 3 Dimensi
Tekstur Candi Sari		

Lanjutan Tabel 4.15.

Warna Candi Sari		
		
Pencapaian Candi Sari		
		

Tabel 4.16. Perbandingan Visualisasi VR-SIG Interior

Perbandingan	Kondisi Nyata	Visualisasi 3 Dimensi
Tekstur Candi Sari		
Warna Candi Sari		
Pencahayaannya Candi Sari		

Dapat dilihat pada Tabel 4.15. dan 4.16. analisis perbandingan hasil visualisasi antara foto dokumentasi dengan VR-SIG dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Visualisasi VR-SIG memiliki aspek tekstur batuan yang sama dengan aslinya.
2. Visualisasi VR-SIG memiliki aspek tekstur pembentuk relief yang kurang mendetail dikarenakan pada proses pemodelan menggunakan perangkat lunak *virtual reality* dilakukan penyederhanaan jumlah jaring pembentuk

model 3D. Pada visualisasi VR-SIG hanya menggunakan 1,199,999 *faces* sedangkan pada pemodelan 3D menggunakan perangkat lunak pengolah foto udara jumlah poligon pembentuk model 3D menggunakan sebanyak 12,405,438 *faces*. Pengurangan jumlah poligon pembentuk model 3D ini bertujuan untuk mengurangi beban kinerja komputer saat *rendering* dan saat pengoperasian *virtual reality* menggunakan ponsel.

3. Visualisasi VR-SIG memiliki aspek warna yang tidak sama dengan keadaan nyatanya. Hal ini disebabkan oleh perangkat lunak pengolah *virtual reality* yang tidak dapat membaca warna lebih dari satu dalam satu objek *mesh* sehingga hanya dapat diwarnai dengan warna yang mendekati keadaan nyata.
4. Visualisasi VR-SIG memiliki aspek pencahayaan yang berbeda dengan foto dokumentasi. Hal ini dikarenakan dalam pengambilan foto dokumentasi dengan penggambaran visualisasi 3D berbeda sehingga menghasilkan pencahayaan yang berbeda pula.
5. Berdasarkan resolusi radiometrik sebagai penilaian dari visualisasi suatu model atau gambar, hasil foto dokumentasi dan model 3D VR-SIG memiliki jumlah *bit depth* yang sama yaitu sebesar 24 bit. Namun dalam visualisasi terlihat berbeda antara foto dokumentasi dengan VR-SIG. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh aspek pencahayaan yang berbeda antara foto dokumentasi dengan VR-SIG.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang didapatkan berdasarkan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Telah berhasil dibuat sebuah *virtual reality* SIG (VR-SIG) Candi Sari dengan menggunakan integrasi data dari metode fotogrametri jarak dekat dan TLS sehingga dapat dioperasikan menggunakan ponsel yang terhubung dengan *VR-BOX*.
2. Berdasarkan konsep objek model 3D menurut *CityGML* visualisasi dari VR-SIG Candi Sari yang dihasilkan termasuk kedalam *level of detail* (LoD) 4 pemodelan objek 3D yang mendetail dengan eksterior dan interior bangunan. Ketelitian geometri model 3D Candi Sari berdasarkan konsep pemodelan objek 3D menurut *CityGML* menggunakan nilai RMSe GCP dan ICP integrasi sebagai variabel pendekatan ketelitian model. Pada model 3D Candi Sari berdasarkan nilai RMSe GCP sumbu X, Y, dan Z yaitu 0.011 m, 0.009 m, dan 0.033 m sedangkan untuk nilai RMSe ICP integrasi sumbu X, Y, dan Z yaitu 0.019 m, 0.032 m, 0.017 m. Nilai RMSe dari GCP dan ICP sudah memenuhi ketentuan konsep *CityGML* yang diperuntukan bangunan dengan visualisasi eksterior dan interior (LoD 4) yaitu sebesar 0.2 meter. Pergeseran titik GCP dan ICP integrasi pada model 3D Candi Sari disebabkan oleh kesalahan bukan sistematis hal ini dikarenakan arah dari kedua resultan *error* baik GCP maupun ICP integrasi tidak beraturan. Pada sumbu Z dari GCP memiliki *error* dua kali lebih besar dari sumbu X dan Y. Pada GCP *error* terbesar pada sumbu X adalah sebesar 1.6 cm dan sumbu Y sebesar 1.6 cm sedangkan pada ICP integrasi *error* terbesar pada

sumbu X sebesar 4.7 cm, sumbu Y sebesar 9.6 cm, dan sumbu Z sebesar 4.5 cm.

3. Visualisasi VR-SIG Candi Sari yang dihasilkan memiliki tekstur batuan yang sama dengan keadaan nyata namun untuk pendetailan relief, warna, dan pencahayaan yang dihasilkan berbeda dengan keadaan yang sebenarnya. Hal ini dikarenakan beberapa faktor seperti pengurangan jumlah poligon guna mengurangi kinerja komputer saat pengolahan dan visualisasi pada ponsel, keterbatasan perangkat lunak, dan penggambaran visualisasi 3D yang berbeda dengan pengambilan foto dokumentasi. Peran SIG dalam VR-SIG ini terdapat pada penyisipan model 3D Candi Sari yang bersifat spasial serta informasi historikal, arsitektural, fungsi bangunan, dan kondisi bangunan yang bersifat non-spasial dengan menggunakan prinsip *model text* sehingga penulis dapat secara langsung menyisipkan informasi tanpa terlebih dahulu membuat dan menyusun *database*.

5.2. Saran

Adapun saran yang dapat diberikan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Dalam pemodelan 3D Candi Sari menggunakan data akuisisi TLS perlu memperkecil dahulu ukuran file *point clouds* TLS dengan melakukan *subsampling* karena dapat memberatkan kinerja komputer dalam melakukan proses pengolahan.
2. Perlu menggunakan komputer yang mempunyai memori RAM diatas 4 GB agar tidak mengalami proses yang lama dalam pengolahan dan *rendering* model 3D.
3. Perlu mengurangi jumlah jaring pembentuk model 3D karena dapat mengurangi kinerja komputer saat *rendering*, proses pengolahan menggunakan perangkat lunak pengolah *virtual reality*, dan saat pengoperasian *virtual reality* di ponsel.

DAFTAR PUSTAKA

- Akmal, E. 2016. *Kajian Perbandingan Ketelitian Model Tiga Dimensi Tugu Yogyakarta Hasil Pemodelan Fotogrametri jarak dekat Jarak Dekat dan Data Terrestrial Laser Scanning*. Yogyakarta: UGM.
- Alrianingrum, S. 2010. *Cagar Budaya Kota Surabaya Sebagai Sumber Belajar (Studi Kasus: Mahasiswa Pendidikan Sejarah Fakultas Ilmu Sosial di Universitas Negeri Surabaya)*. Tesis. Program Studi Pendidikan Sejarah, Pascasarjana Universitas Sebelas Maret Surakarta.
- Amirebrahimi, S., Rajabifard, A., Mendis, P., Ngo, T. 2016. *A BIM-GIS integration method in support of the assessment and 3D visualisation of flood damage to a building*. *Journal of Spatial Science* 61(2): 317–350.
- Atkinson, K. B. 1996. *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Whittles Publishing. London, UK.
- Azuma, R. T. 1997. *A Survey of Augmented Reality*. In *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 6(4): 355-385.
- Biljecki, F., Heuvelink, G.B.M., Ledoux, H., Stoter, J. 2018. *The effect of acquisition error and level of detail on the accuracy of spatial analyses*. *Cartography and Geographic Information Science* 45(2): 156–176.
- Biljecki, F. 2013. *The Concept of Level of Detail*. PhD Thesis Proposal. Netherlands: TU Delft.
- BPCB. 2013. *Selayang Pandang*. Yogyakarta: Balai Pelestarian Cagar Budaya DIY.
- Burdea, G. C. & Coiffet, P. 2008. *Virtual Reality Technology, 2nd ed*. Delhi: Wiley.
- Clark, J. H. 1976. *Hierarchical Geometric Models for Visible Surface Algorithms*. In *Communications of the Acm*, (pp. 547-554). ACM.

- DPPK Jogja. 2012. *Peta Administrasi Kabupaten Sleman*. <http://dppka.jogjaprovo.go.id/peta-diy.html>. Dikunjungi pada tanggal 15 Desember 2018 pukul 21.15 WIB.
- ERDAS. 1999. *ERDAS Field Guide, 5th edition*. United States of America: ERDAS Inc.
- Geosystems, L. 2006. *HDS Training Manual: Scanning & Cyclone*. Leica Geosystems, Inc.: San Ramon, CA.
- Gmaps. 2018. *Candi Sari Yoyakarta*. <https://plus.google.com/photos/photo/111556245295880651475/6151981881161681490>. Dikunjungi pada tanggal 15 Desember 2018 pukul 21.06 WIB.
- Genechten, V. 2008. *In Theory and Practice on Terrestrial Laser Scanning: Training Material Based on Practical Applications*, Universidad Politecnica de Valencia Editorial, p. 19,24.
- Halarnkar, P. & Shah. 2012. *A Review on Virtual Reality*. IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 9 (1): 325-330.
- Heywood, D.I., Cornelius, S.C. & Carver, S.J. 2011. *An Introduction to Geographical Information Systems. Fourth edn*. London : Pearson Prentice Hall.
- Hu, F. 2016. *Virtual Reality Enhanced Robotic Systems for Disability Rehabilitation*. Hershey PA : IGI Global.
- Linsen, L. 2001. *Point cloud representation*. Univ., Fak. fur Informatik, Bibliothek.
- Lousiana Geographic Information System Council. 2018. *How Does GIS Work?*. <http://lagic.lsu.edu/gisprimer/whatsgis.asp?topic=howitworks>. Dikunjungi pada tanggal 11 Oktober 2018 pukul 22.43 WIB.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. & Harley, I. 2006. *Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications*. United Kingdom: Whittles Publishing.
- Maurya, R. K. 2009. *Computer Graphics with Virtual Reality Systems*. India: Wiley.



- Mazuryk, T. & Gervautz, M. 1996. *Virtual Reality History, Applications, Technology and Future*. Institute of Computer Graphics, Vienna University of Technology, Austria, pp. 15-16, 58-60.
- Milgram, P & Kishino, A. F. 1994. *Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays*. IEICE Transactions on Information and Systems. E77- D(12), pp. 1321-1329.
- Milgram, P., Kishino, A. F., Takemura, H. & Utsumi, A. 1994. *Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum*. Telemanipulator and Telepresence Technologies. SPIE Vol. 2351, pp. 282-292.
- Moussa, W. 2014. *Integration of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for Cultural Heritage Data Recording*. PhD Thesis Proposal. German: University of Stuttgart.
- Mulyono, Y.E.R., Cahyono, A.B., Pratomo, D.G. & Yuwono. 2018. *Analisis Pemodelan 3D Candi Jawi Menggunakan Wahana Quadcopter dan Terrestrial Laser Scanner (TLS)*. Geoid, Vol. 12(2): 207-214.
- Naufatunnisa, S.N. & Cahyono, A.B. 2017. *Pemodelan 3 Dimensi Candi Wringinlawang Menggunakan Metode Structure from Motion untuk Dokumentasi Cagar Budaya*. Jurnal Teknik ITS, Vol. 6(02): 2337-3520.
- Pasman, W. & Jansen, F. W. 2002. *Scheduling Level of Detail with Guaranteed Quality and Cost*. Proc. Web3D Conference. February 24-28, 2002, Tempe, AZ, pp. 43-51.
- Pasman, W, W, A. van der Schaaf, R L Lagendijk, F W Jansen. 1999. *Low latency rendering and positioning for mobile augmented reality*. In: B. Girod, H. Niemann, H.P. Seidel (eds.); Proceedings Vision Modeling and Visualization '99 (Erlangen, Nov. 1999). Infix. Sankt Augustin. 1999. p. 309-315. ISBN: 3-89601-015-8.
- Perpusnas. 2014. *Candi Sari*. Diakses dari Perpustakaan Nasional Republik Indonesia: [http://candi.perpusnas.go.id/temples/deskripsi-



- yogyakarta-candi_sari] pada tanggal 16 Desember 2018 pukul 20.16 WIB.
- Prahasta, E. 2000. *Konsep-konsep Dasar Sistem Informasi Geografis*. Bandung: Informatika.
- Quintero, M.S. 2008. *Theory and Practice on Terrestrial Laser Scanning*. The Learning Tools for Advanced Three Dimensional Surveying in Risk Awareness Project (3D Risk Mapping).
- Rachmawan, F. E., Handayani, H. H. & Pribadi, C. B. 2016. *Survei Tiga Dimensi Tugu Pahlawan Menggunakan Metode Terrestrial Laser Scanning Untuk Visualisasi dan Analisa Ketinggian Bangunan (Studi Kasus: Tugu Pahlawan, Surabaya, Jawa Timur)*. Geoid, Vol.11(02): 184-189.
- Remondino, F. & Fraser, C. 2011. *Uav Photogrammetry For Mapping and 3D Modelling – Current Status and Future Perspectives* -. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 37 (1): 25-31.
- Reshetyuk, Y. 2009. *Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning*. Doctoral Thesis. Department of Transport and Economics, Division of Geodesy, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, January .
- Revit, 2018. *Model Text*. Diakses dari Autodesk: [<https://knowledge.autodesk.com/support/revit-products/learnexplore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/ENU/Revit-Model/files/GUID-29383BC3-332D-4021-864D-AE173B7F9E63-htm.html>] pada 6 Juli 2019 pukul 17.15 WIB.
- Rusu, R.B. and Cousins, S. 2011. *3D Is Here: Point Cloud Library (PCL)*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, 9-13 May 2011, 1-4.s
- Slater, M. & Usoh, M. 1994. *A Steed: Depth of Presence in Virtual Environments*. Presence, Vol. 3, No. 2, pp. 130-144.

- Snavely, N. 2010. *Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections*. Proceedings of the IEEE.
- Soudarissanane, S. 2016. *The Geometry of Terrestrial Laser Scanning: Identification of Errors, Modeling and Mitigation of Scanning Geometry*. Doctoral dissertation, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Suharsana. 1997. *Fotogrametri jarak dekat Dasar*. Jurusan teknik Geodesi. Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Sukojo, B. M., Suryani, E. & Swastyastu, Cempaka A. 2015. *Sistem Informasi Geografis (Teori dan Aplikasi)*. Surabaya: Pusat Studi Infrastruktur Data Spasial Lembaga Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Suwardhi, D. & Murtiyoso, A. D. 2017. *Teknik Pencocokan Citra dalam Fotogrametri untuk Dokumentasi Cagar Budaya*. Bunga Rampai Forum Peneliti Muda Indonesia 2017. pp. 242-260.
- Threesiana, R., Suwardhi, D. & Riyanto, S. 2013. *Development Of Virtual Reality Gis For Cultural Heritage Conservation (Case Study: Sewu Temple)*. Indonesian Journal Of Geospatial, Vol. 1(02): 17-30.
- Trieb, P. B. & Kilpatrick, D. 2004. *Digital Close-range Stereophotogrammetry for Heritage Recording*. RCI Incorporation.
- Ullman, S. 1979. *The interpretation of structure from motion*. Proceeding of the Royal Society of London. Series B. Biological Science. Royal Society, pp. 405-426.
- UU Nomor 11 Tahun 2010. *Tentang Cagar Budaya Pasal 1 Ayat 1*. Jakarta: Kementerian Pariwisata.
- Vidiardi, S., Djuniadi, Subiyanto & Iksan, N. 2015. *Pengembangan Museum Virtual Interaktif Menggunakan Teknologi Desktop Virtual Reality Pada Museum Ranggawarsita*. Skripsi. Teknik Informatika dan Komputer, Universitas Negeri Semarang.

- Vijlbrief, T. & P.J.M, van Oosterom. 1992. *GEO++: An extensible GIS*. In proceedings 5th International Symposium on Spatial Data Handling. Charleston: South Carolina.
- Von Schweber, L. & E. 1995. *Virtually Here*. PC Magazine - March 14, 1995, pp. 168-198.
- Westoby, M.J., J Brasington, N.F Glasser, M.J. Hambrey, & J.M. Reynolds. 2012. *Structure-from-motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience application*. *Geomorphology* (Elsevier) 179: 300- 314.

Lampiran 1: Dokumentasi Penelitian

No.	Gambar	Keterangan
1.	 A photograph showing the front facade of the Candi Sari temple. The structure is multi-tiered with a central entrance and several smaller openings. The stone is weathered and grey. A person is standing on the steps leading up to the entrance for scale.	Tampak depan bangunan Candi Sari
2.	 A photograph showing the right side of the Candi Sari temple. The temple has two prominent spires on top. The stone is dark and weathered. A person is standing on the steps leading up to the temple for scale.	Tampak samping kanan Candi Sari dari arah gerbang pintu masuk

3.		Bagian tengah interior bangunan Candi Sari
4.		Bagian interior hiasan pada dinding Candi Sari

Gambar-gambar diatas merupakan dokumentasi penulis saat melakukan pengambilan informasi semantik berupa sejarah, arsitektur, fungsi, dan kondisi bangunan saat ini dari Candi Sari.

Lampiran 2: Permohonan Data Informasi Semantik Candi Sari



KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
BALAI PELESTARIAN CAGAR BUDAYA
D.I. Y O G Y A K A R T A

JalanYogya-Solo Km. 15 Bogem, Kalasan, Sleman Yogyakarta 55571
Telepon: (0274) 496019, 496419; Faksimile : (0274) 496019
Laman : Purbakalayogya.com; Pos-el : bp3diy@yahoo.com

Nomor : 409 / E.18 / HM / 2019
Hal : Permohonan Data

13 Februari 2019

Yth. Mokhammad Nur Cahyadi, ST,MSc, Phd
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

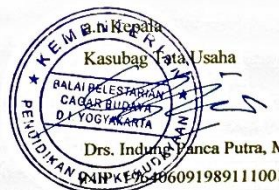
Dengan hormat,

Sehubungan dengan surat Nomor 9406/IT2.VI.4.5/TU.00.09/2019 tanggal 1 Februari 2019 perihal tersebut pada pokok surat, pada prinsipnya kami tidak keberatan memberikan bantuan data kepada mahasiswa Departemen Teknik Geomatika Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang tersebut dibawah ini :

No	Nama Mahasiswa	NRP	Departemen
1	Hana Widyatari	0331154000082	Teknik Geomatika

Untuk mencari data dalam rangka menyusun tugas akhir dengan judul "*Pembangunan Virtual Reality GIS (VR-GIS) sebagai Pengembangan Teknologi Visualisasi Heritage Historical Building (Studi Kasus : Candi Sari)*". Adapun kegiatan akan dilaksanakan bulan Februari - Maret 2019 dengan Narasumber yang ditunjuk adalah Septi Indrawati K, SS, M.A. Setelah kegiatan selesai diharap menyerahkan salinan skripsi ke BPCB D.I. Yogyakarta.

Demikian atas perhatian dan kerjasamanya kami ucapkan terima kasih.



Lampiran 3: Permohonan Raw Data Candi Sari



KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI, DAN PENDIDIKAN TINGGI
 INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
 FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN, DAN KEBUMIHAN
 DEPARTEMEN TEKNIK GEOMATIKA

Kampus ITS Sukolilo-Surabaya 60111
 Telp: 031-5929486-87, 5994251-55, Fax: 031-5929487, PABX: 1149
 E-mail: geodesy@its.ac.id
<http://www.geomatika.its.ac.id>

Surabaya, 05 Desember 2018

Nomor : 086855 /IT2.VI.4.5/TU.00.09/2018
 Lamp. : --
 Perihal : Permohonan Bantuan Data.

Kepada Yth :
 Bapak Dr. Deni Suwardhi, ST.,MT.
 Kkinsig ITB
 Jl. Tamansari No. 64
 Tamansari Bandung.

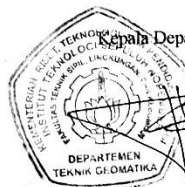
Sehubungan dengan kegiatan Tugas akhir mahasiswa kami angkatan 2015 Departemen Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, yang berjudul "Pembangunan Virtual Reality GIS (VR – GIS) dan Analisis Visualisasi Geometrik Sebagai Sarana Wisata Edukasi Pada Cagar Budaya (Studi kasus : Candi Sari)" dengan ini kami mengharapkan kerjasama berupa permohonan data sebagai berikut :

- 3D Modelling Candi Sari
- Raw Data Candi Sari

Adapun nama Mahasiswa tersebut adalah :

Nama : Hana Widyatari
 NRP. : 033115 4000 0082

Demikian atas perhatian, bantuan serta kerjasamanya, kami ucapkan terima kasih.



Kepala Departemen,

Mokhamad Nur Cahyadi, ST, MSc, PhD
 NIP.19811223 200501 1 002

Lampiran 4: *Report* Eksterior UAV dan Foto Terrestrial

Agisoft PhotoScan

Processing Report

15 June 2019



Survey Data

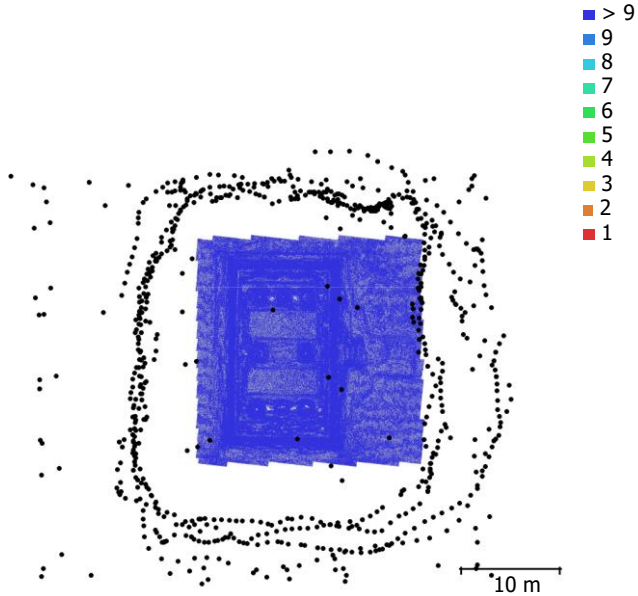


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	742	Camera stations:	740
Flying altitude:	21.8 m	Tie points:	252,127
Ground resolution:	7.84 mm/pix	Projections:	1,678,958
Coverage area:	465 m ²	Reprojection error:	1.17 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC330 (3.61mm)	4000 x 3000	3.61 mm	1.56 x 1.56 μ m	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

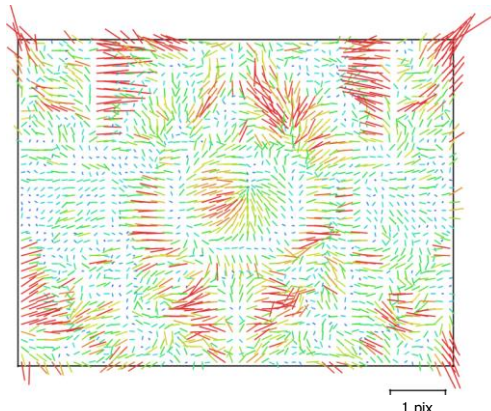


Fig. 2. Image residuals for FC330 (3.61mm).

FC330 (3.61mm)

742 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	4000 x 3000	3.61 mm	1.56 x 1.56 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
F	2357.39	0.022	1.00	0.00	-0.21	-0.36	-0.02	-0.22	0.27	-0.24	-0.01	-0.17
Cx	48.5888	0.026		1.00	-0.03	-0.06	0.12	0.01	-0.00	0.00	0.89	-0.04
Cy	-27.9425	0.026			1.00	-0.23	-0.03	-0.02	0.00	-0.01	-0.03	0.73
B1	-4.82983	0.0097				1.00	0.04	-0.03	-0.00	0.01	-0.03	0.02
B2	0.276623	0.0088					1.00	0.02	-0.01	0.00	-0.03	0.00
K1	0.00254098	2.5e-05						1.00	-0.96	0.90	-0.01	-0.07
K2	-0.0112086	5.1e-05							1.00	-0.98	0.01	0.02
K3	0.00479484	3.2e-05								1.00	-0.00	-0.02
P1	-0.000110234	3.3e-06									1.00	-0.04
P2	-0.000397021	2.7e-06										1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Calibration

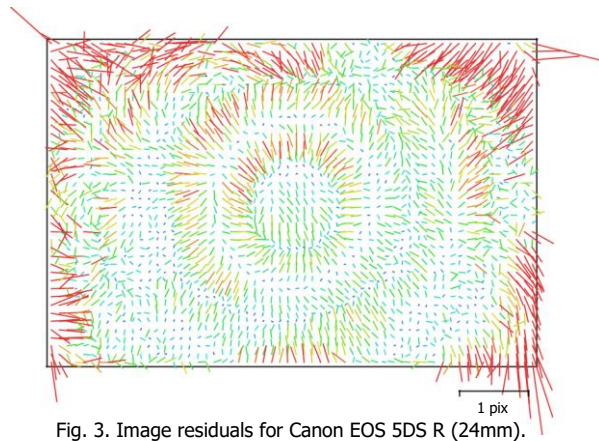


Fig. 3. Image residuals for Canon EOS 5DS R (24mm).

Canon EOS 5DS R (24mm)

138 images

Type Frame	Resolution 8688 x 5792	Focal Length 24 mm	Pixel Size 4.24 x 4.24 μm
F:	5884.98		
Cx:	-4.1626	B1:	2.33554
Cy:	3.9792	B2:	0.851033
K1:	-0.140174	P1:	-0.000909393
K2:	0.138998	P2:	0.000718843
K3:	-0.128294	P3:	0
K4:	0.0776767	P4:	0

Camera Calibration

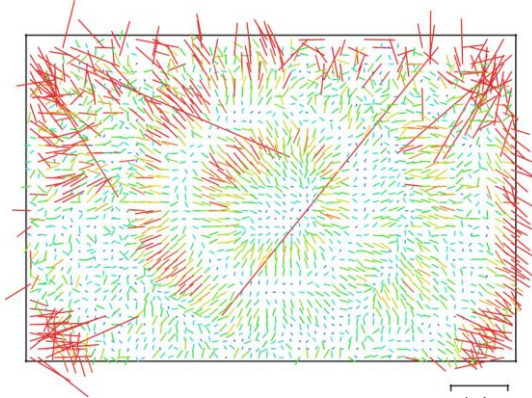


Fig. 4. Image residuals for Canon EOS 5DS R (28mm).

Canon EOS 5DS R (28mm)

50 images

Type Frame	Resolution 8688 x 5792	Focal Length 28 mm	Pixel Size 4.24 x 4.24 μm
F:	6642.06		
Cx:	0.722025	B1:	2.133
Cy:	4.39891	B2:	0.609113
K1:	-0.0973064	P1:	-0.000863826
K2:	0.109911	P2:	0.000964596
K3:	-0.033404	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Camera Calibration

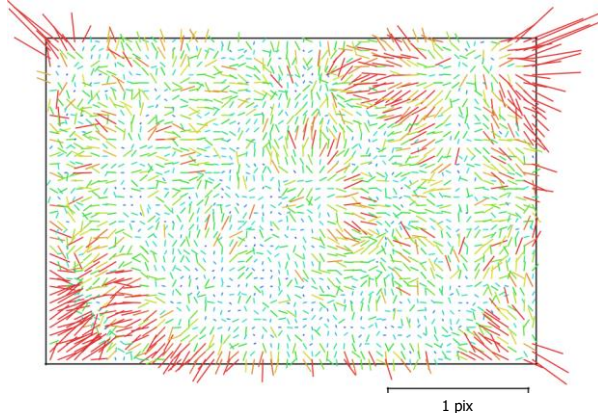


Fig. 5. Image residuals for Canon EOS 5DS R (70mm).

Canon EOS 5DS R (70mm)

324 images

Type Frame	Resolution 8688 x 5792	Focal Length 70 mm	Pixel Size 4.24 x 4.24 μm
F:	16799		
Cx:	-20.787	B1:	6.54813
Cy:	37.4183	B2:	0.260295
K1:	0.327464	P1:	-0.00165791
K2:	-0.187108	P2:	0.00251507
K3:	3.00579	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Camera Locations

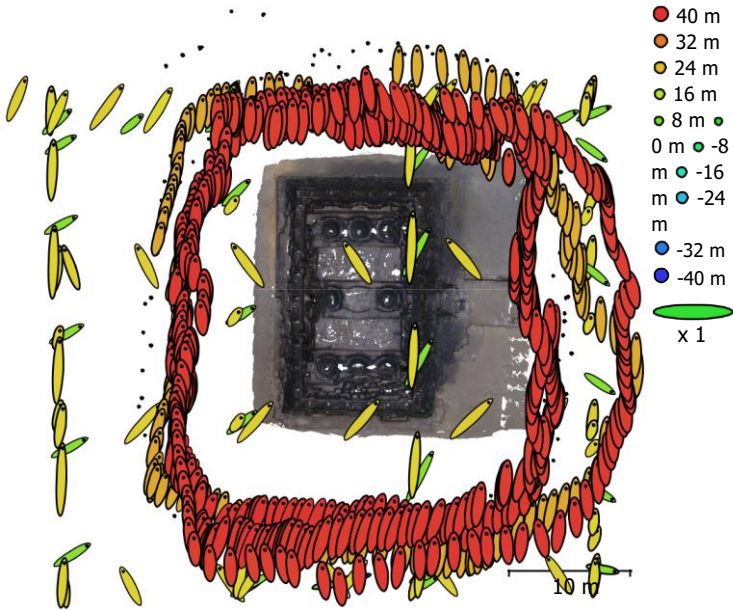


Fig. 6. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total error (m)
0.686702	2.43262	34.6453	2.52768	34.7374

Table 3. Average camera location error.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Ground Control Points

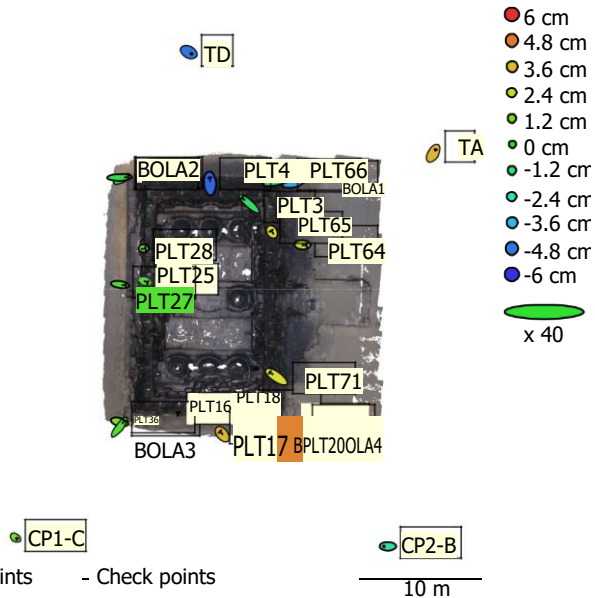


Fig. 7. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape. Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
4	1.11296	0.868019	3.26248	1.41143	3.5547

Table 4. Control points RMSE.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
19	2.16719	1.3488	2.78304	2.55264	3.77641

Table 5. Check points RMSE.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
CP1-C	0.573649	-0.408937	1.31092	1.48822	0.799 (4)
CP2-B	-1.60043	-0.0218026	-2.0128	2.57161	0.761 (4)
TA	0.919904	1.57952	3.69216	4.11985	0.479 (3)
TD	1.10364	-0.592645	-4.81385	4.97417	0.395 (3)
Total	1.11296	0.868019	3.26248	3.5547	0.656

Table 6. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z -
Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
BOLA1	2.74347	0.759561	-3.93668	4.85809	0.379 (5)
BOLA2	2.17071	1.09603	-0.50533	2.48368	0.419 (6)
BOLA3	1.94126	-0.453503	1.4597	2.47081	0.728 (5)
BOLA4	0.609051	0.68844	5.03605	5.11924	0.220 (7)
PLT3	-2.90652	2.57129	-0.896614	3.98288	0.669 (8)
PLT4	-0.154944	2.45221	-5.10243	5.66322	0.389 (6)
PLT16	0.319379	1.88225	2.05418	2.80437	0.470 (7)
PLT17	-0.946614	1.18729	3.67421	3.97563	0.914 (14)
PLT18	-2.23175	1.00041	3.06498	3.92117	0.360 (7)
PLT20	-1.96063	0.162213	4.58855	4.99251	0.774 (7)
PLT25	1.03653	-0.41214	0.607999	1.2704	0.340 (7)
PLT27	2.33016	-0.31639	0.370741	2.38058	0.707 (7)
PLT28	0.505934	-0.0169329	1.33877	1.43128	0.633 (6)
PLT29	3.5092	0.0903742	-0.367791	3.52958	0.431 (5)
PLT36	2.14046	2.8658	0.560723	3.62061	0.798 (8)
PLT64	1.39492	-0.0434038	2.39723	2.77388	0.625 (7)
PLT65	-0.355674	0.576448	3.15769	3.22952	0.575 (8)
PLT66	4.60288	1.09948	-1.38184	4.92999	0.305 (17)
PLT71	-2.76588	1.8626	2.92097	4.43299	0.352 (7)
Total	2.16719	1.3488	2.78304	3.77641	0.578

Table 7. Check points.
X - Easting, Y - Northing, Z -
Altitude.

Digital Elevation Model

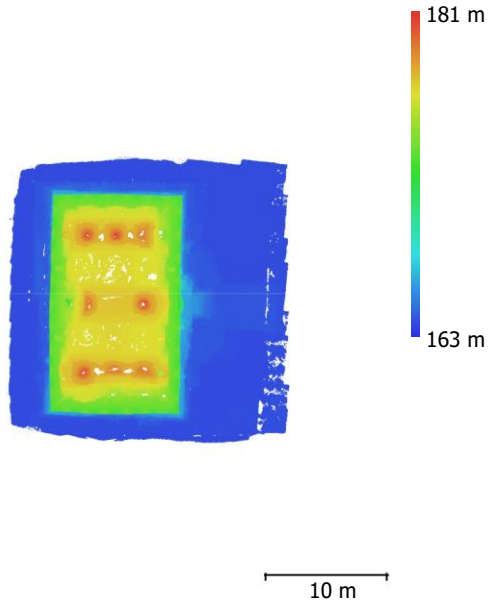


Fig. 8. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 1.15 cm/pix
Point density: 75.6 points/cm²

Processing Parameters

General

Cameras	1254
Aligned cameras	1246
Markers	35
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 49S (EPSG::32749)
Rotation angles	Omega, Phi, Kappa

Point Cloud

Points	375,417 of 614,136
RMS reprojection error	0.224384 (1.14781 pix)
Max reprojection error	1.42316 (50.4458 pix)
Mean key point size	4.32561 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	10.4488

Dense Point Cloud

Points	60,027,791
Point colors	3 bands, uint8

Reconstruction parameters

Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive

Model

Faces	19,053,126
Vertices	9,543,316
Vertex colors	3 bands, uint8
Texture	4,096 x 4,096, 4 bands, uint8

Texturing parameters

Mapping mode	Generic
Blending mode	Mosaic
Texture size	4,096 x 4,096
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	Yes
UV mapping time	4 minutes 5 seconds
Blending time	2 hours 16 minutes

Software

Version	1.4.2 build 6185
Platform	Windows 64

Lampiran 5 : *Report* Eksterior UAV

UAV FOTO EKSTERIOR

**Processing Report
18 May 2019**



Survey Data

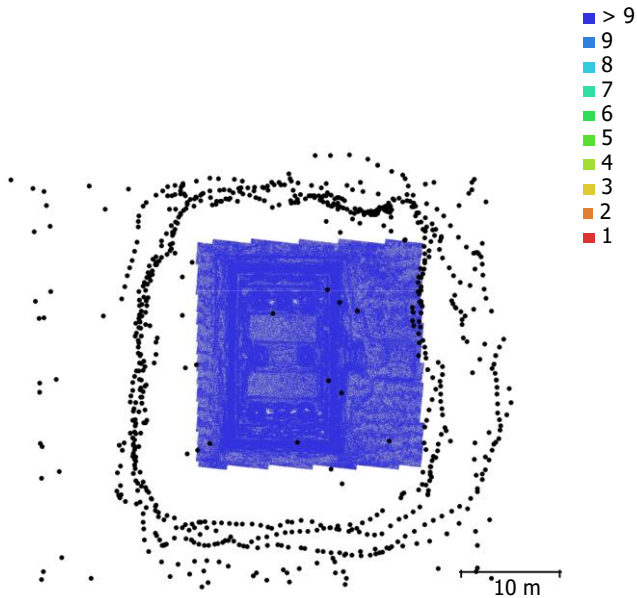


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	742	Camera stations:	740
Flying altitude:	21.8 m	Tie points:	252,127
Ground resolution:	7.84 mm/pix	Projections:	1,678,958
Coverage area:	465 m ²	Reprojection error:	1.17 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC330 (3.61mm)	4000 x 3000	3.61 mm	1.56 x 1.56 μ m	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

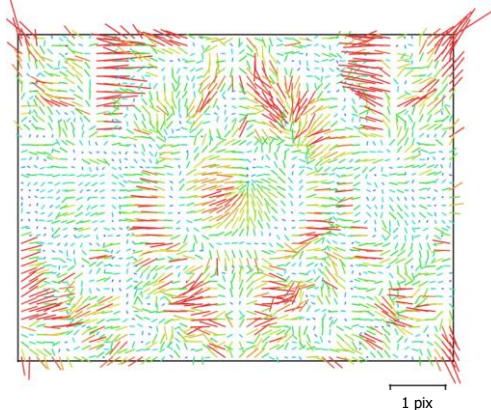


Fig. 2. Image residuals for FC330 (3.61mm).

FC330 (3.61mm)

742 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	4000 x 3000	3.61 mm	1.56 x 1.56 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
F	2357.39	0.022	1.00	0.00	-0.21	-0.36	-0.02	-0.22	0.27	-0.24	-0.01	-0.17
Cx	48.5888	0.026		1.00	-0.03	-0.06	0.12	0.01	-0.00	0.00	0.89	-0.04
Cy	-27.9425	0.026			1.00	-0.23	-0.03	-0.02	0.00	-0.01	-0.03	0.73
B1	-4.82983	0.0097				1.00	0.04	-0.03	-0.00	0.01	-0.03	0.02
B2	0.276623	0.0088					1.00	0.02	-0.01	0.00	-0.03	0.00
K1	0.00254098	2.5e-05						1.00	-0.96	0.90	-0.01	-0.07
K2	-0.0112086	5.1e-05							1.00	-0.98	0.01	0.02
K3	0.00479484	3.2e-05								1.00	-0.00	-0.02
P1	-0.000110234	3.3e-06									1.00	-0.04
P2	-0.000397021	2.7e-06										1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Locations

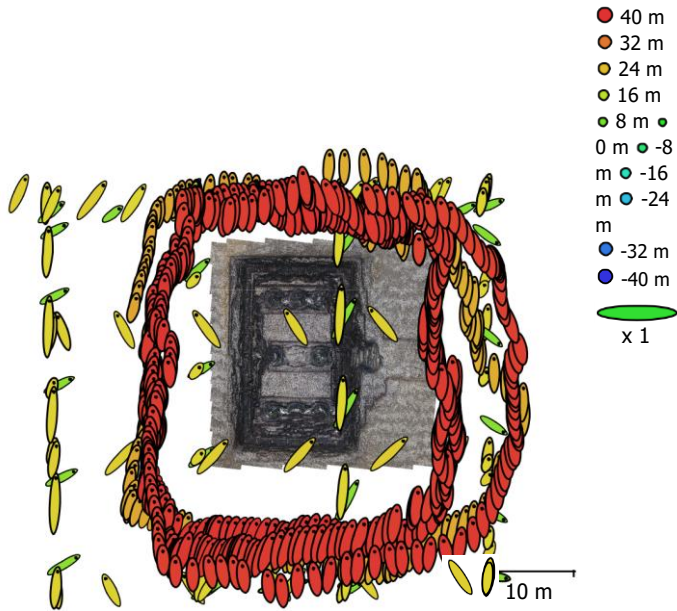


Fig. 3. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total error (m)
0.699346	2.4176	34.6536	2.51672	34.7448

Table 3. Average camera location error.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Ground Control Points

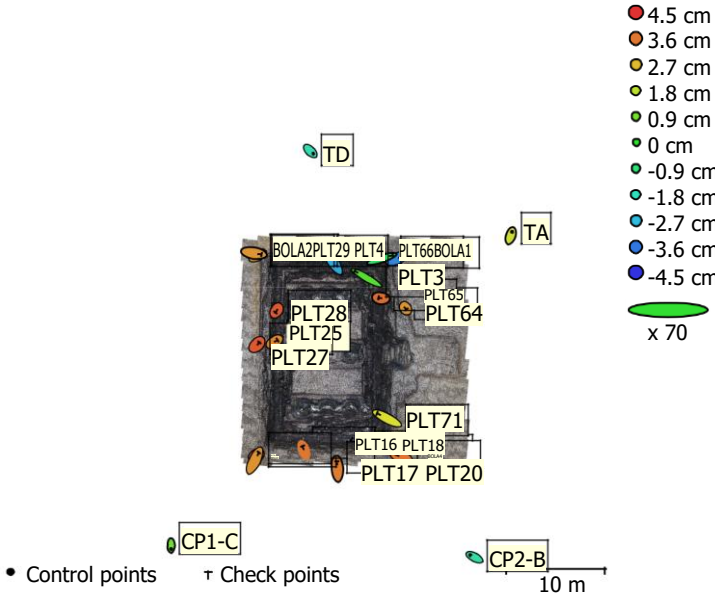


Fig. 4. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape. Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
4	0.765832	0.906997	1.57104	1.18707	1.96908

Table 4. Control points RMSE.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
19	1.64888	1.25954	3.26252	2.07491	3.86643

Table 5. Check points RMSE.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TD	0.829541	-0.758934	-1.66328	2.00764	0.325 (7)
CP1-C	-0.0150765	-1.01451	0.797034	1.29024	0.610 (5)
CP2-B	-1.2315	0.656275	-1.48373	2.03685	0.525 (6)
TA	0.375547	1.12012	2.06625	2.38015	0.475 (5)
Total	0.765832	0.906997	1.57104	1.96908	0.484

Table 6. Control points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
BOLA2	1.04885	0.560176	3.07961	3.30119	0.419 (6)
BOLA3	0.538307	0.30178	4.13879	4.18454	0.457 (5)
BOLA4	0.00956504	0.709631	3.54843	3.61871	0.220 (7)
BOLA1	1.54779	0.645358	-3.39609	3.78755	0.379 (5)
PLT16	-0.460087	1.3048	3.59238	3.8496	0.530 (10)
PLT17	-0.171692	2.15199	3.50549	4.11691	0.398 (7)
PLT18	-1.91161	1.62045	3.30348	4.14646	0.545 (10)
PLT20	-1.6669	0.67867	3.59542	4.02072	0.349 (5)
PLT25	0.915068	0.568233	3.35917	3.52764	0.856 (5)
PLT27	0.687452	0.694825	3.99094	4.10889	0.594 (6)
PLT28	-0.334835	-0.521909	3.96179	4.01002	0.633 (6)
PLT29	2.19356	-0.342229	3.20774	3.90108	0.431 (5)
PLT36	1.17612	2.37628	3.2319	4.18032	0.352 (6)
PLT64	0.280473	-0.364304	3.24644	3.27883	0.491 (10)
PLT65	-0.824302	0.117859	3.73388	3.82561	0.575 (8)
PLT66	3.19558	1.0671	-0.621223	3.42583	0.305 (17)
PLT71	-2.89851	1.49804	2.24345	3.95962	0.352 (7)
PLT3	-3.45486	2.02792	0.481057	4.03484	0.669 (8)
PLT4	-1.50781	2.21669	-2.94796	3.98468	0.389 (6)
Total	1.64888	1.25954	3.26252	3.86643	0.484

Table 7. Check points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

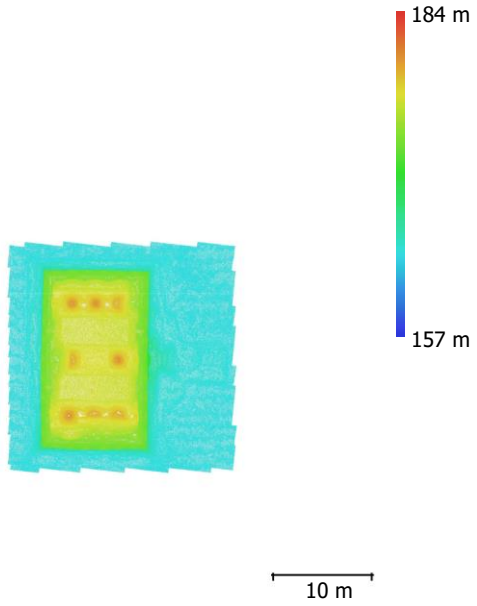


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: unknown
Point density: unknown

Processing Parameters

General

Cameras	742
Aligned cameras	740
Markers	29
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 49S (EPSG::32749)
Rotation angles	Omega, Phi, Kappa

Point Cloud

Points	252,127 of 360,855
RMS reprojection error	0.255401 (1.17019 pix)
Max reprojection error	1.42316 (35.8847 pix)
Mean key point size	4.13783 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	8.90099

Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Yes
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	1 hours 51 minutes
Alignment time	34 minutes 2 seconds

Optimization parameters

Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	45 seconds

Dense Point Cloud

Points	2,287,327
Point colors	3 bands, uint8

Reconstruction parameters

Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	15 hours 29 minutes
Dense cloud generation time	1 days 2 hours

Software

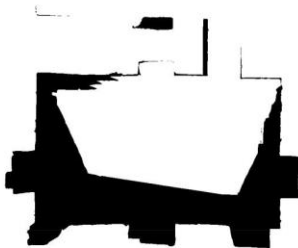
Version	1.4.2 build 6185
Platform	Windows 64

Lampiran 6 : *Report Interior Foto Terrestrial*

Terrestrial FOTO INTERIOR

Processing Report

18 May 2019



Survey Data

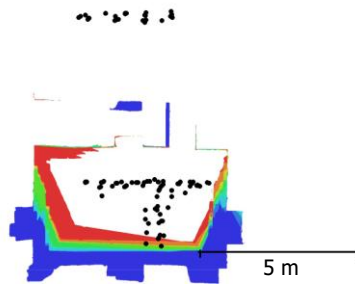


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	124	Camera stations:	94
Flying altitude:	2.61 m	Tie points:	39,306
Ground resolution:	0.407 mm/pix	Projections:	387,654
Coverage area:	13.2 m ²	Reprojection error:	0.898 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
Canon EOS 5DS R (24mm)	8688 x 5792	24 mm	4.24 x 4.24 μ m	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

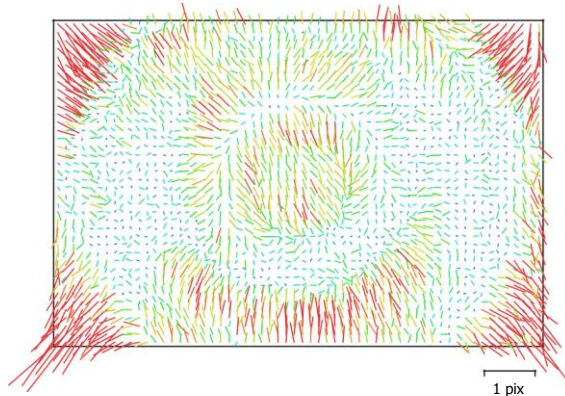


Fig. 2. Image residuals for Canon EOS 5DS R (24mm).

Canon EOS 5DS R (24mm)

124 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	8688 x 5792	24 mm	4.24 x 4.24 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	5904.85	0.057	1.00	-0.07	-0.16	-0.08	-0.03	-0.25	0.28	-0.26	0.25	-0.08	-0.11
Cx	-9.5889	0.043		1.00	-0.04	0.09	0.07	-0.01	0.01	-0.02	0.02	0.85	-0.08
Cy	-38.2633	0.044			1.00	-0.01	0.01	0.00	-0.02	0.02	-0.02	-0.01	0.82
B1	-0.483111	0.0054				1.00	0.00	0.05	-0.06	0.05	-0.05	0.02	0.03
B2	-0.0758269	0.0054					1.00	-0.00	0.00	-0.01	0.01	0.02	-0.03
K1	-0.14092	4.5e-05						1.00	-0.97	0.93	-0.88	-0.01	0.00
K2	0.139867	0.00022							1.00	-0.99	0.96	0.01	-0.01
K3	-0.128753	0.0004								1.00	-0.99	-0.02	0.01
K4	0.0764022	0.00025									1.00	0.02	-0.01
P1	-0.00116934	1.5e-06										1.00	-0.05
P2	6.11963e-05	1.4e-06											1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Ground Control Points

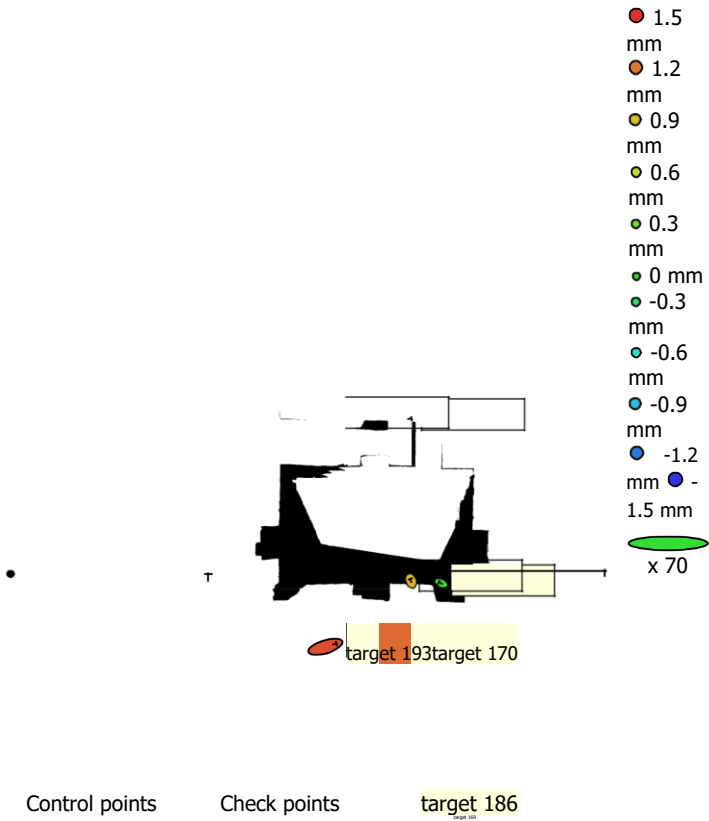


Fig. 3. GCP locations and error estimates.
 Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
 Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)
4	5.78111	1.83395	1.04084	6.06503	6.15369

Table 3. Check points RMSE.
 X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
target 169	-2.39182	1.04405	0.0800667	2.61099	0.190 (35)
target 170	6.43388	1.13246	1.2472	6.65077	0.105 (11)
target 186	-0.716792	1.75535	0.928274	2.1111	0.134 (5)
target 193	9.2766	2.82837	1.38195	9.79616	0.132 (13)
Total	5.78111	1.83395	1.04084	6.15369	0.163

Table 4. Check points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

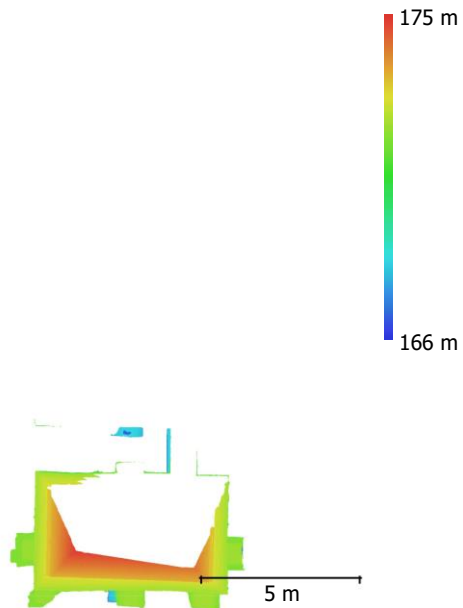


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 1.09 cm/pix
Point density: 84.9 points/cm²

Processing Parameters

General	
Cameras	124
Aligned cameras	94
Markers	4
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 49S (EPSG::32749)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	39,306 of 64,451
RMS reprojection error	0.155091 (0.897622 pix)
Max reprojection error	0.643565 (14.8392 pix)
Mean key point size	5.62459 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	10.359
Alignment parameters	
Accuracy	Medium
Generic preselection	Yes
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	13 minutes 1 seconds
Alignment time	38 seconds
Optimization parameters	
Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	2 seconds
Dense Point Cloud	
Points	31,063,458
Point colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	4 hours 23 minutes
Dense cloud generation time	22 minutes 18 seconds
Model	
Faces	8,402,497
Vertices	4,211,561
Vertex colors	3 bands, uint8
Software	
Version	1.4.2 build 6185
Platform	Windows 64

Lampiran 7 : *Report* Eksterior Foto Terrestrial

Terrestrial FOTO EKSTERIOR

Processing Report

18 May 2019



Survey Data

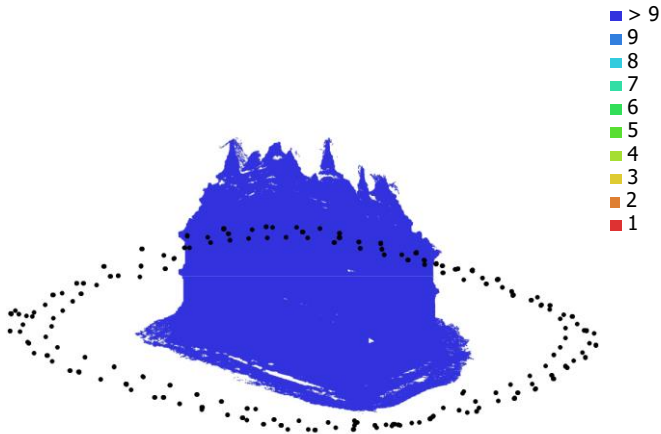


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	512	Camera stations:	506
		Tie points:	123,290
		Projections:	1,382,370
		Reprojection error:	1.12 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
Canon EOS 5DS R (24mm)	8688 x 5792	24 mm	4.24 x 4.24 μm	No
Canon EOS 5DS R (28mm)	8688 x 5792	28 mm	4.24 x 4.24 μm	No
Canon EOS 5DS R (70mm)	8688 x 5792	70 mm	4.24 x 4.24 μm	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

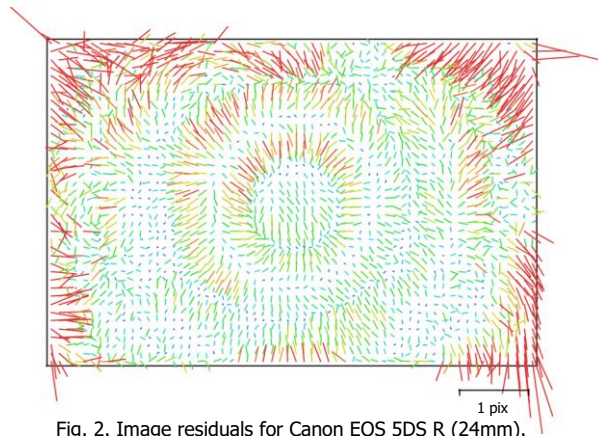


Fig. 2. Image residuals for Canon EOS 5DS R (24mm).

Canon EOS 5DS R (24mm)

138 images

Type Frame	Resolution 8688 x 5792	Focal Length 24 mm	Pixel Size 4.24 x 4.24 μm
F:	5884.98		
Cx:	-4.1626	B1:	2.33554
Cy:	3.9792	B2:	0.851033
K1:	-0.140174	P1:	-0.000909393
K2:	0.138998	P2:	0.000718843
K3:	-0.128294	P3:	0
K4:	0.0776767	P4:	0

Camera Calibration

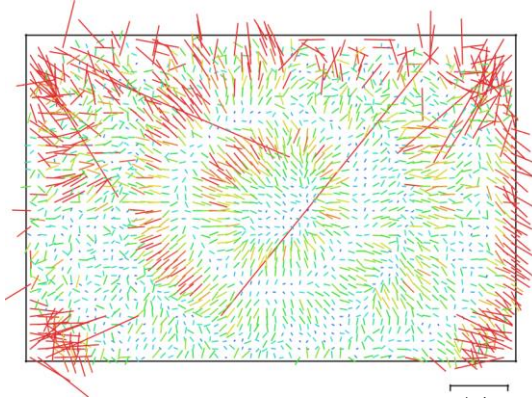


Fig. 3. Image residuals for Canon EOS 5DS R (28mm).

Canon EOS 5DS R (28mm)

50 images

Type Frame	Resolution 8688 x 5792	Focal Length 28 mm	Pixel Size 4.24 x 4.24 μm
F:	6642.06		
Cx:	0.722025	B1:	2.133
Cy:	4.39891	B2:	0.609113
K1:	-0.0973064	P1:	-0.000863826
K2:	0.109911	P2:	0.000964596
K3:	-0.033404	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Camera Calibration

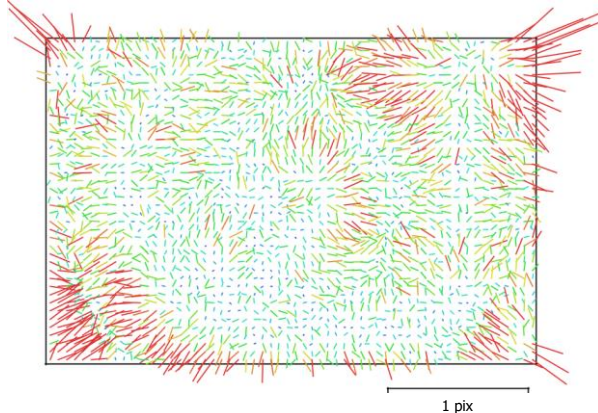


Fig. 4. Image residuals for Canon EOS 5DS R (70mm).

Canon EOS 5DS R (70mm)

324 images

Type Frame	Resolution 8688 x 5792	Focal Length 70 mm	Pixel Size 4.24 x 4.24 μm
F:	16799		
Cx:	-20.787	B1:	6.54813
Cy:	37.4183	B2:	0.260295
K1:	0.327464	P1:	-0.00165791
K2:	-0.187108	P2:	0.00251507
K3:	3.00579	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Digital Elevation Model

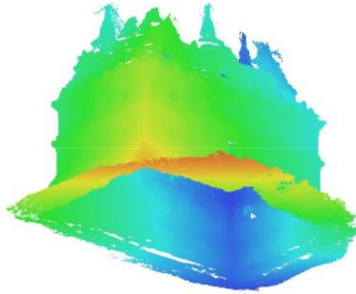


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Processing Parameters

General

Cameras	512
Aligned cameras	506
Markers	25
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 49S (EPSG::32749)
Rotation angles	Omega, Phi, Kappa

Point Cloud

Points	123,290 of 253,281
RMS reprojection error	0.179649 (1.12002 pix)
Max reprojection error	0.563218 (50.4455 pix)
Mean key point size	4.55369 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	12.654

Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	2 hours 25 minutes
Alignment time	30 minutes 37 seconds

Dense Point Cloud

Points	58,379,225
Point colors	3 bands, uint8

Reconstruction parameters

Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	2 days 1 hours
Dense cloud generation time	1 days 9 hours

Software

Version	1.4.2 build 6185
Platform	Windows 64

Lampiran 8 : *Report* Eksterior dan Interior UAV dan Foto Terrestrial

Eksterior & Interior UAV dan Terrestrial

Processing Report

11 July 2019



Survey Data

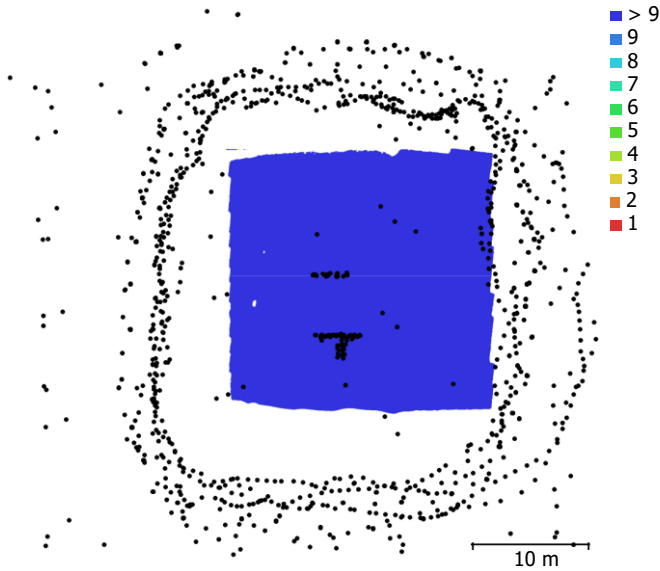


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	1,378	Camera stations:	1,340
Flying altitude:	17.5 m	Tie points:	414,723
Ground resolution:	1.49 mm/pix	Projections:	3,448,982
Coverage area:	501 m ²	Reprojection error:	1.12 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
Canon EOS 5DS R (24mm)	8688 x 5792	24 mm	4.24 x 4.24 μ m	No
FC330 (3.61mm)	4000 x 3000	3.61 mm	1.56 x 1.56 μ m	No
Canon EOS 5DS R (24mm)	8688 x 5792	24 mm	4.24 x 4.24 μ m	No
Canon EOS 5DS R (28mm)	8688 x 5792	28 mm	4.24 x 4.24 μ m	No
Canon EOS 5DS R (70mm)	8688 x 5792	70 mm	4.24 x 4.24 μ m	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

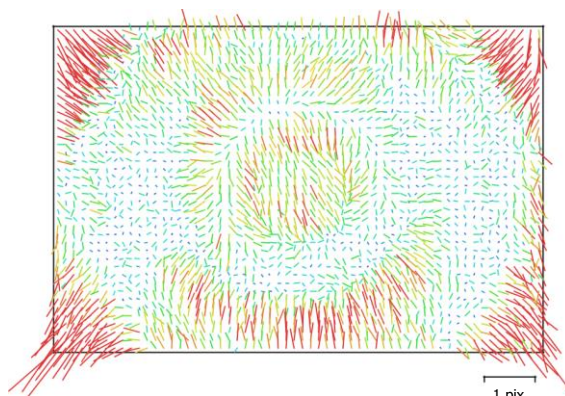


Fig. 2. Image residuals for Canon EOS 5DS R (24mm).

Canon EOS 5DS R (24mm)

124 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	8688 x 5792	24 mm	4.24 x 4.24 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	5904.85	0.057	1.00	-0.07	-0.16	-0.08	-0.03	-0.25	0.28	-0.26	0.25	-0.08	-0.11
Cx	-9.5889	0.043		1.00	-0.04	0.09	0.07	-0.01	0.01	-0.02	0.02	0.85	-0.08
Cy	-38.2633	0.044			1.00	-0.01	0.01	0.00	-0.02	0.02	-0.02	-0.01	0.82
B1	-0.483111	0.0054				1.00	0.00	0.05	-0.06	0.05	-0.05	0.02	0.03
B2	-0.0758269	0.0054					1.00	-0.00	0.00	-0.01	0.01	0.02	-0.03
K1	-0.14092	4.5e-05						1.00	-0.97	0.93	-0.88	-0.01	0.00
K2	0.139867	0.00022							1.00	-0.99	0.96	0.01	-0.01
K3	-0.128753	0.0004								1.00	-0.99	-0.02	0.01
K4	0.0764022	0.00025									1.00	0.02	-0.01
P1	-0.00116934	1.5e-06										1.00	-0.05
P2	6.11963e-05	1.4e-06											1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix

Camera Calibration

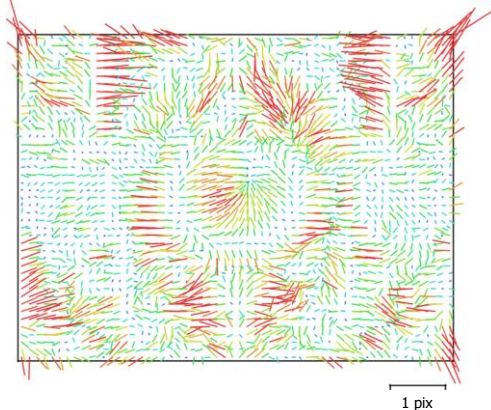


Fig. 3. Image residuals for FC330 (3.61mm).

FC330 (3.61mm)

742 images

Type
Frame

Resolution
4000 x 3000

Focal Length
3.61 mm

Pixel Size
1.56 x 1.56 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
F	2357.39	0.022	1.00	0.00	-0.21	-0.36	-0.02	-0.22	0.27	-0.24	-0.01	-0.17
Cx	48.5888	0.026		1.00	-0.03	-0.06	0.12	0.01	-0.00	0.00	0.89	-0.04
Cy	-27.9425	0.026			1.00	-0.23	-0.03	-0.02	0.00	-0.01	-0.03	0.73
B1	-4.82983	0.0097				1.00	0.04	-0.03	-0.00	0.01	-0.03	0.02
B2	0.276623	0.0088					1.00	0.02	-0.01	0.00	-0.03	0.00
K1	0.00254098	2.5e-05						1.00	-0.96	0.90	-0.01	-0.07
K2	-0.0112086	5.1e-05							1.00	-0.98	0.01	0.02
K3	0.00479484	3.2e-05								1.00	-0.00	-0.02
P1	-0.000110234	3.3e-06									1.00	-0.04
P2	-0.000397021	2.7e-06										1.00

Table 3. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Calibration

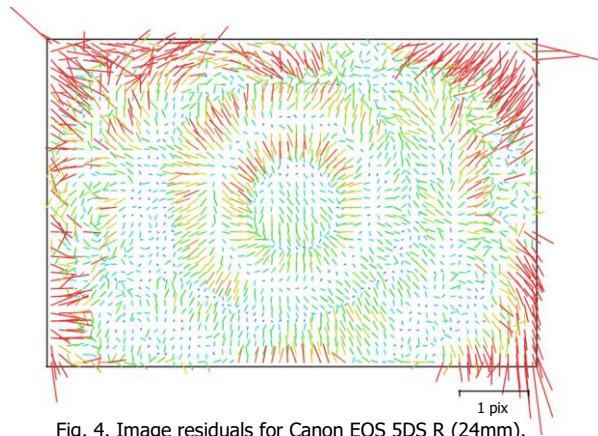


Fig. 4. Image residuals for Canon EOS 5DS R (24mm).

Canon EOS 5DS R (24mm)

138 images

Type Frame	Resolution 8688 x 5792	Focal Length 24 mm	Pixel Size 4.24 x 4.24 μm
F:	5884.98		
Cx:	-4.1626	B1:	2.33554
Cy:	3.9792	B2:	0.851033
K1:	-0.140174	P1:	-0.000909393
K2:	0.138998	P2:	0.000718843
K3:	-0.128294	P3:	0
K4:	0.0776767	P4:	0

Camera Calibration

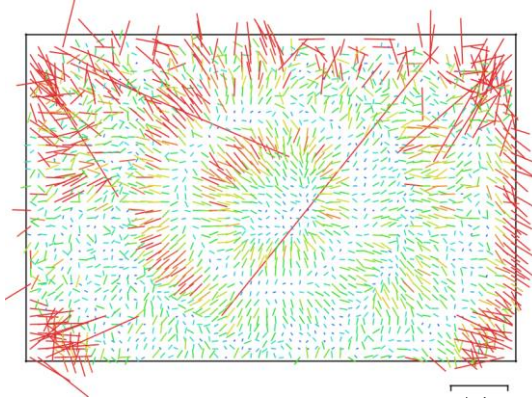


Fig. 5. Image residuals for Canon EOS 5DS R (28mm).

Canon EOS 5DS R (28mm)

50 images

Type Frame	Resolution 8688 x 5792	Focal Length 28 mm	Pixel Size 4.24 x 4.24 μm
F:	6642.06		
Cx:	0.722025	B1:	2.133
Cy:	4.39891	B2:	0.609113
K1:	-0.0973064	P1:	-0.000863826
K2:	0.109911	P2:	0.000964596
K3:	-0.033404	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Camera Calibration

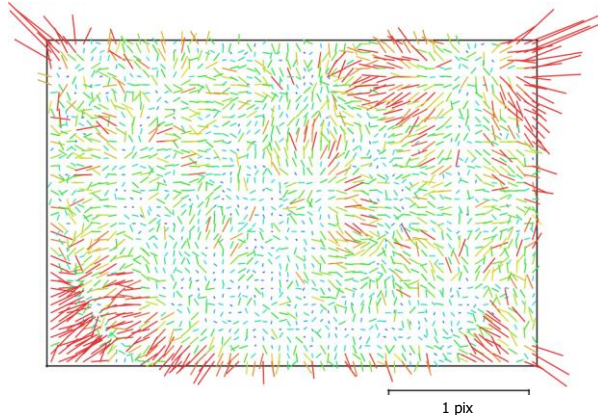


Fig. 6. Image residuals for Canon EOS 5DS R (70mm).

Canon EOS 5DS R (70mm)

324 images

Type Frame	Resolution 8688 x 5792	Focal Length 70 mm	Pixel Size 4.24 x 4.24 μm
F:	16799		
Cx:	-20.787	B1:	6.54813
Cy:	37.4183	B2:	0.260295
K1:	0.327464	P1:	-0.00165791
K2:	-0.187108	P2:	0.00251507
K3:	3.00579	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Camera Locations

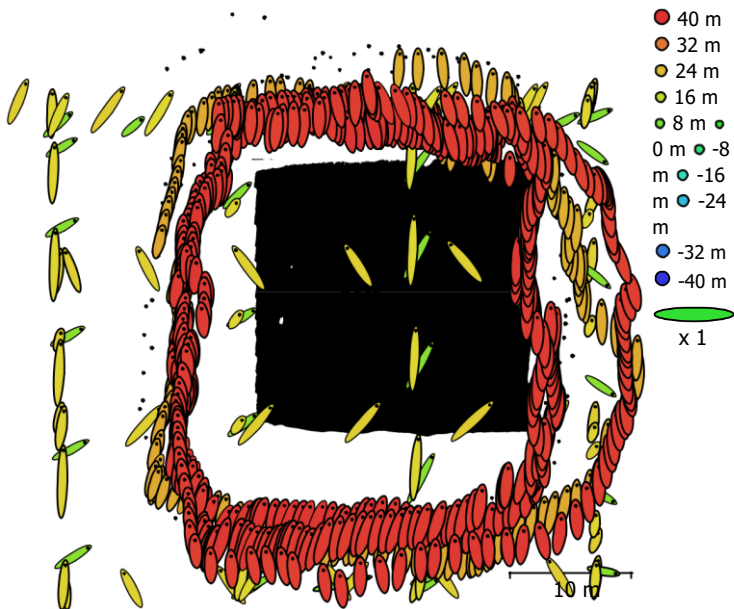


Fig. 7. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total error (m)
0.686714	2.43263	34.6453	2.5277	34.7373

Table 4. Average camera location error.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Ground Control Points

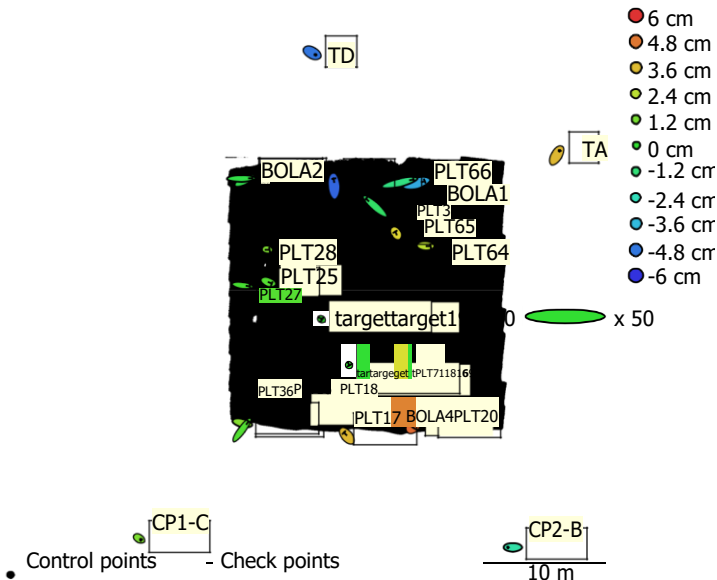


Fig. 8. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
4	1.11435	0.867367	3.26304	1.41213	3.5555

Table 5. Control points RMSE.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
23	1.97067	1.22671	2.52841	2.32129	3.43238

Table 6. Check points RMSE.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
CP1-C	0.573675	-0.407755	1.30968	1.48682	0.799 (4)
CP2-B	-1.59947	-0.0231349	-2.01706	2.57437	0.761 (4)
TA	0.923686	1.57885	3.68527	4.11427	0.479 (3)
TD	1.10747	-0.591374	-4.81921	4.98006	0.395 (3)
Total	1.11435	0.867367	3.26304	3.5555	0.656

Table 7. Control points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
BOLA1	2.74681	0.759813	-3.94224	4.86452	0.379 (5)
BOLA2	2.17362	1.09747	-0.509461	2.48769	0.419 (6)
BOLA3	1.94247	-0.452682	1.45696	2.46998	0.728 (5)
BOLA4	0.610695	0.688118	5.03191	5.11532	0.220 (7)
PLT3	-2.90318	2.57207	-0.901499	3.98205	0.669 (8)
PLT4	-0.151925	2.45302	-5.10727	5.66786	0.389 (6)
PLT16	0.320869	1.88277	2.05095	2.80253	0.470 (7)
PLT17	-0.945315	1.18737	3.67068	3.97208	0.914 (14)
PLT18	-2.22983	1.00069	3.06126	3.91725	0.360 (7)
PLT20	-1.95909	0.161817	4.58437	4.98805	0.774 (7)
PLT25	1.03895	-0.410992	0.604343	1.27026	0.340 (7)
PLT27	2.33221	-0.315286	0.367197	2.3819	0.707 (7)
PLT28	0.508438	-0.0157683	1.33491	1.42855	0.633 (6)
PLT29	3.512	0.0917442	-0.371951	3.53284	0.431 (5)
PLT36	2.14159	2.86656	0.557929	3.62144	0.798 (8)
PLT64	1.39773	-0.0434266	2.39195	2.77073	0.625 (7)
PLT65	-0.352478	0.576954	3.15275	3.22443	0.575 (8)
PLT66	4.60609	1.09975	-1.38734	4.9346	0.305 (17)
PLT71	-2.76367	1.86274	2.91682	4.42894	0.352 (7)
target 169	-0.0704522	0.00662338	-0.0295091	0.0766693	0.190 (35)
target 170	-0.0589056	0.133312	-0.0018472	0.145758	0.105 (11)
target 186	0.037021	-0.0658278	0.0299199	0.0812346	0.134 (5)

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
target 193	0.0923331	-0.074105	0.00143703	0.118402	0.132 (13)
Total	1.97067	1.22671	2.52841	3.43238	0.489

Table 8. Check points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

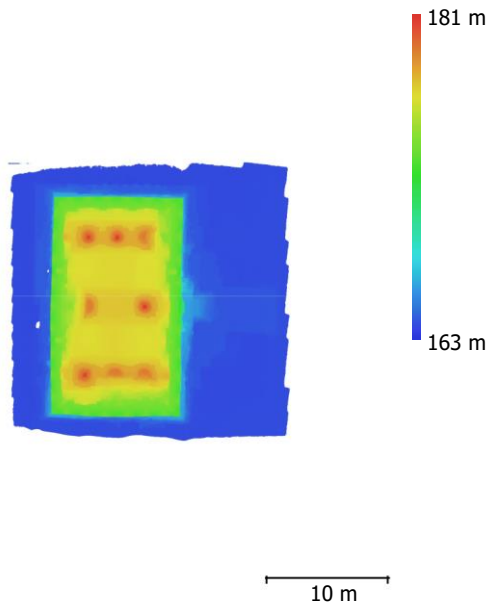


Fig. 9. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 5.96 mm/pix
Point density: 282 points/cm²

Processing Parameters

General

Cameras	1378
Aligned cameras	1340
Markers	39
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 49S (EPSG::32749)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

Point Cloud

Points	414,723 of 678,587
RMS reprojection error	0.217699 (1.12247 pix)
Max reprojection error	1.42317 (50.4457 pix)
Mean key point size	4.47162 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	10.4403

Model

Faces	8,899,999
Vertices	4,452,905
Vertex colors	3 bands, uint8

Reconstruction parameters

Surface type	Arbitrary
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Face count	4,001,852

Software

Version	1.4.2 build 6185
Platform	Windows 64

BIODATA PENULIS



Hana Widyatari lahir di Jakarta pada tanggal 23 November 1997. Anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Dikdik Musadiq dan Elis Rachmawati. Pendidikan formal yang ditempuh penulis antara lain SDPN Sabang Bandung, SMPN 27 Bandung, dan SMAN 7 Bandung. Pada tahun 2015, penulis diterima pada Program Studi Teknik Geomatika FTSLK-ITS. Selama menjalani perkuliahan, penulis juga cukup aktif diberbagai kegiatan keilmiahan, diantaranya penulis pernah menjadi finalis 25 terbaik KTI *Geo-innovation Bootcamp* BIG tahun 2017 dan lolos terdananai PKM KC tahun 2017. Dalam penyelesaian studi sarjananya, penulis mengambil penelitian tugas akhir di bidang keahlian ilmu Geospasial dan Fotogrametri dengan judul “Pembuatan *Virtual Reality* SIG (VR-SIG) sebagai Pengembangan Teknologi Visualisasi Situs Bangunan Cagar Budaya (Studi Kasus: Candi Sari)”.