

**ANALISIS DEFORMASI MENGGUNAKAN METODE  
FOTOGRAMETRI RENTANG DEKAT BERBASIS UAV (*UNMANNED  
AERIAL VEHICLE*)  
(Studi Kasus : Candi Gedong Songo)**

Gantra S.D. Hutahaean<sup>\*)</sup>, Yudo Prasetyo, Nurhadi Bashit

Departemen Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. Sudarto, SH, Tembalang, Semarang Telp.(024)76480785, 76480788  
Email: gantra24@gmail.com

**ABSTRAK**

Candi Gedong Songo merupakan sebuah kompleks bangunan Candi Hindu yang terletak di Desa Candi, Kecamatan Bandungan, Semarang, Jawa tengah. Candi Gedong Songo dilindungi oleh UU RI No.11 Tahun 2010 tentang cagar budaya yang disebutkan bahwa pelestarian cagar budaya harus didukung oleh kegiatan pendokumentasian sebelum dilakukan kegiatan yang dapat menyebabkan terjadinya perubahan keasliannya. Seiring berjalannya waktu, Candi Gedong Songo dapat mengalami pengikisan oleh alam (air hujan, angin, matahari dan lain-lain) yang berpotensi menyebabkan deformasi pada candi, baik pada bentuk, tekstur maupun posisi. Maka dari itu, dibutuhkan upaya pelestarian Candi Gedong Songo agar tidak hilang keberadaannya sehingga bisa mempertahankan nilai sejarahnya. Penelitian ini menggunakan metode fotogrametri rentang dekat/*close range photogrammetry* berbasis UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). Akuisisi foto dilakukan secara temporal untuk mengetahui deformasi model. Hasil akhir dari penelitian ini adalah model 3D digital Candi Gedong Songo serta analisis deformasi model 3D. Nilai selisih jarak tertinggi pada uji model pertama adalah 0,015 mm dan 0,019 mm pada model kedua. Analisis deformasi pada kedua model dilakukan dengan analisis geometrik dengan hasil nilai tertinggi adalah 7 mm dan terendah adalah 1 mm dengan rata-rata 3,91 mm. Akurasi yang dimiliki model yaitu 8,4 mm oleh karena itu, model mengalami pergeseran namun tidak termasuk dalam deformasi karena hasil analisis geometrik masih dalam rentangan akurasi model. Model pertama dan model kedua dengan rentang waktu 3 bulan dapat disimpulkan tidak terdeteksi deformasi.

**Kata Kunci:** Candi Gedong Songo, Deformasi, Fotogrametri Rentang Dekat, UAV.

**ABSTRACT**

*Gedong Songo Temple is a Hindu temple complex located in Candi Village, Bandungan District, Semarang, Central Java. Gedong Songo Temple is protected by Republic of Indonesian Law No.11 of 2010 concerning cultural heritage which states that preservation of cultural heritage must be supported by documentation before activities that can cause changes to its authenticity. Over time, Gedong Songo Temple can experience erosion by nature (rain water, wind, sun, etc.) which has the potential to cause deformation in the temple, both in shape, texture and position. Therefore, efforts are needed to preserve Gedong Songo Temple so that its existence is not lost so that it can maintain its historical value. This research uses close range photogrammetry method based on UAV (Unmanned Aerial Vehicle). The photo acquisition is done temporally to determine the model deformation. The final result of this research is the digital 3D model of Gedong Songo Temple and 3D model deformation analysis. The highest distance value difference in the first model test was 0.015 mm and 0.019 mm in the second model. Deformation analysis on the two models was carried out with geometric analysis with the highest value being 7 mm and the lowest being 1 mm with an average of 3.91 mm. The accuracy of the model is 8.4 mm. Therefore, the model has shifted but is not included in the deformation because the results of the geometric analysis are still in the range of the accuracy of the model. The first model and the second model with a span of 3 months can be concluded no deformation was detected.*

**Keywords:** Close Range Photogrammetry, Deformation, Gedong Songo Temple, UAV.

<sup>\*)</sup>Penulis Utama, Penanggung Jawab

## I. Pendahuluan

### I.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang kaya akan peninggalan bersejarah, salah satunya adalah candi yang merupakan salah satu ikon bangunan bersejarah yang sangat penting untuk dilindungi. Candi merupakan suatu bangunan kuno yang terbuat dari batu sebagai tempat ibadah agama Hindu atau Buddha pada zaman dulu (KBBI, 2019). Selain Candi Borobudur yang berlokasi di Kabupaten Magelang, Kabupaten Semarang juga memiliki candi yang kerap dikunjungi oleh para wisatawan yaitu Candi Gedong Songo yang terletak di Bandungan.

Candi sebagai bangunan bersejarah perlu dilakukan pelestarian guna menjaga bangunan bersejarah tersebut agar tidak rusak dan hilang keberadaannya ditelan zaman. Langkah rekonstruksi dan konservasi merupakan langkah penting yang mengacu pada pendokumentasian bangunan tersebut untuk mengetahui dimensi geometri bangunan, serta terkait dengan seberapa besar perubahan dimensi geometri bangunan yang terjadi dalam kurun waktu tertentu (Jefferson, 2015). Selain memperhatikan aspek temporal yang berkaitan dengan pelestarian candi, hal spesifik yang dapat dikaji adalah pengaruh bentuk topografi lokasi candi Bandungan memiliki bentuk topografi yang relatif curam karena berada di kaki lereng Gunung Ungaran yang memiliki kondisi curah hujan yang cukup tinggi. Seiring berjalannya waktu dapat mempengaruhi kondisi fisik candi berupa perubahan bentuk, struktur, bahkan posisi. Perubahan bentuk, struktur dan posisi suatu objek disebut juga dengan deformasi. Deformasi dapat terjadi akibat pengaruh dari faktor alam seperti hujan, angin dan panas matahari.

Candi Gedong Songo dilindungi oleh UU RI No.11 Tahun 2010 tentang cagar budaya yang disebutkan bahwa pelestarian cagar budaya harus didukung oleh kegiatan pendokumentasian sebelum dilakukan kegiatan yang dapat menyebabkan terjadinya perubahan keasliannya. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mendokumentasikan bangunan bersejarah yang dilakukan dengan pengambilan foto objek untuk dibentuk menjadi model 3D.

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode fotogrametri rentang dekat (*Close Range Photogrammetry*) menggunakan wahana UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). Pengolahan data UAV menggunakan perangkat lunak Agisoft Photoscan untuk rekonstruksi model 3D dan Agisoft Lens untuk kalibrasi kamera UAV. Akuisisi data UAV akan dilakukan secara temporal dengan kurun waktu 3 bulan dan model 3D dibentuk untuk masing-masing waktu. Analisis deformasi dilakukan dengan analisis geometrik objek terdeformasi dengan menghitung besar besarnya vektor pergeseran koordinat. Penelitian ini dilakukan untuk mendukung upaya pelestarian Candi Gedong Songo melalui pembuatan model 3D dan analisis deformasi pada Candi Gedong Songo dilakukan untuk mengetahui deformasi dalam kurun waktu 3 bulan.

### I.2 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana hasil pembentukan visualisasi model 3D objek penelitian dengan menggunakan perangkat lunak Agisoft Photoscan?
2. Bagaimana analisis uji model 3D dan analisis deformasi pada model 3D objek penelitian?

### I.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

1. Tujuan penelitian ini sebagai berikut:
  - a. Mengetahui hasil pembentukan model 3D objek dengan menggunakan perangkat lunak Agisoft Photoscan.
  - b. Mengetahui analisis uji model 3D dan analisis deformasi pada model 3D objek penelitian
2. Manfaat yang didapat dari penelitian ini sebagai berikut:
  - a. Aspek keilmuan: Memberikan kontribusi dalam pemodelan 3D menggunakan ilmu fotogrametri dan penginderaan jauh dan dapat digunakan untuk penelitian deformasi di waktu yang akan datang
  - b. Aspek Kerekayasaan: Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dokumentasi dalam bentuk model 3D digital untuk keperluan konservasi Candi Gedong Songo

### I.4 Batasan Masalah

Adapun ruang lingkup dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Objek yang menjadi studi kasus penelitian adalah salah satu Candi Gedong Songo yaitu Candi Gedong IV.
2. Proses pemodelan dan rekonstruksi objek penelitian menggunakan metode fotogrametri rentang dekat dengan UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*) dan diolah dengan perangkat lunak Agisoft Photoscan.
3. Analisis deformasi dilakukan dengan membandingkan pergeseran vektor geometri (translasi) pada masing-masing model 3D objek penelitian.
4. Validasi dilakukan dengan menggunakan data hasil pengukuran menggunakan ETS (*Electronic Total Station*).
5. Mode penerbangan akuisisi data UAV dilakukan secara manual dikarenakan kondisi lapangan yang mengganggu jalur penerbangan UAV.

### I.5 Ruang Lingkup Penelitian

#### I.5.1 Lokasi dan Objek Penelitian

Lokasi yang menjadi tempat objek penelitian ini adalah Desa Candi, Bandungan, Semarang yang terletak di koordinat  $7^{\circ}12'12,34''$  LS dan  $110^{\circ}20'18,44''$  BT. Objek penelitian adalah salah satu Candi Gedong Songo yaitu Candi Gedong IV.

#### I.5.2 Peralatan dan Data Penelitian

1. Peralatan
  - A. Perangkat Keras
    - a. Laptop core i5, RAM 4GB, Nvidia GT 635M

- b. Printer
  - c. UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*) DJI Phantom 4 Pro
  - d. GPS Geodetik Topcon Hiper SR
  - e. ETS (*Electronic Total Station*) Nikon Nivo 2.c
- B. Perangkat Lunak
  - a. Sistem Operasi Windows 10
  - b. Microsoft Office 2016
  - c. Agisoft Photoscan
  - d. Agisoft Lens
  - e. Topcon Tools
  - f. Rinex Converter

2. Data Penelitian

Data penelitian yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Data Penelitian

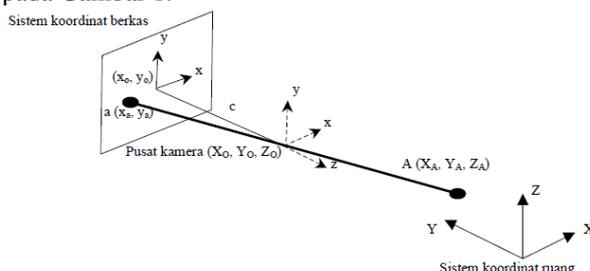
No.	Data	Ketelitian	Tahun
1	Data Pengukuran <i>Electronic Total Station</i>	( $\pm 3 + 2\text{ppm} \times D$ ) mm	2019
2	Data Kalibrasi	-	2019
3	Data Foto Objek	4.864 x 3.648 piksel	2019
4	Data Pengukuran GPS	Horizontal: 0,007 m Vertikal: 0,015 m	2019

II. Tinjauan Pustaka

II.1 Fotogrametri Rentang Dekat (*Close Range Photogrammetry*)

Secara sederhana, istilah fotogrametri berarti proses mengukur gambar pada foto. Sedangkan dalam pengertian yang lebih komprehensif, fotogrametri meliputi: (a) memotret objek; (b) mengukur gambar objek pada foto yang diproses; dan (c) mengurangi pengukuran ke beberapa bentuk yang berguna seperti peta topografi (Moffit dan Mikhail, 1980).

Salah satu cabang fotogrametri adalah fotogrametri rentang dekat atau sering disebut dengan CRP (*Close Range Photogrammetry*). Fotogrametri rentang dekat digunakan untuk menjelaskan teknik fotogrametri dimana jarak antara objek dengan kamera dibawah 100 meter (Atkinson, 1996). Kondisi kolinearitas sebagai prinsip dasar CRP dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Kondisi kolinearitas (Atkinson, 1996)

Prinsip dasar CRP menggunakan prinsip dasar triangulasi. Foto diambil dari dua posisi yang berbeda, sehingga kondisi *line of sight* dapat dikembangkan dari masing-masing kamera ke titik-titik pada objek tertentu. Saat sebuah foto diambil, berkas sinar dari objek akan menjaral menyerupai garis lurus menuju pusat lensa kamera hingga mencapai bidang film. Kondisi dimana titik objek pada dunia nyata, titik pusat proyeksi dan titik obyek pada bidang foto terletak satu garis dalam ruang dinamakan kondisi kegarisan berkas sinar atau kondisi kolinearitas (*collinearity condition*). Kondisi ini merupakan syarat fundamental dalam fotogrametri (Atkinson, 1996).

II.2 *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV)

Salah satu cara untuk mendapatkan informasi spasial berupa foto udara adalah dengan menggunakan sebuah pesawat tanpa awak atau yang biasa disebut UAV fotogrametri. UAV dapat dirujuk dalam banyak hal: RPV (*Remotely piloted Vehicle*), kendaraan yang diemudikan dari jarak jauh, *drone*, pesawat robot dan pesawat tanpa pilot. Departemen Pertahanan (DOD) mendefinisikan UAV sebagai pesawat bertenaga, kendaraan udara yang tidak membawa operator manusia, menggunakan kekuatan aerodinamis untuk memberikan daya angkat kendaraan, dapat terbang secara mandiri atau diujicobakan jarak jauh dan dapat membawa muatan (Bone, 2003).

Sistem UAV terdiri dari komponen pesawat, muatan sensor, dan stasiun pengendali. UAV dioperasikan dengan jaringan *wireless* dari komponen pengendali nya yaitu *remote control* yang digunakan oleh operator. UAV ini memungkinkan untuk melakukan pelacakan posisi dan orientasi sensor yang diterapkan dalam sistem koordinat lokal atau global. Oleh karena itu, fotogrametri UAV dapat dipahami sebagai alat pengukuran fotogrametri baru. Fotogrametri UAV membuka berbagai aplikasi baru dalam lingkup jarak dekat, menggabungkan fotogrametri udara dan terestrial, juga memperkenalkan aplikasi baru secara *real time* dan alternatif *low cost* (Eisenbeiss, 2008).

II.3 Deformasi

Deformasi adalah perubahan bentuk geometri benda dari kondisi awal, ditinjau dari sudut pandang waktu (Chen, 1980). Perubahan yang terjadi perlu dianalisis, hal ini dilakukan dengan survei deformasi. Menurut Sulasdi dalam Hanifa (2007), tujuan dari survey deformasi adalah untuk:

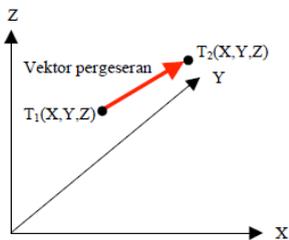
1. Memberikan informasi status geometrik dari benda terdeformasi, yakni perubahan posisi, bentuk dan dimensinya.
2. Memberikan informasi status fisik dari benda terdeformasi, yaitu keadaan dari tekanan internal (*internal stress*) dan relasi beban-deformasi.

Analisis deformasi dilakukan untuk menentukan besarnya pergeseran objek deformasi dan parameter-parameter deformasi. Analisis deformasi memerlukan data objek yang mengalami deformasi. Data tersebut berupa parameter geometrik dan status fisiknya.

Parameter geometrik terdiri atas posisi, bentuk dan dimensi, sedangkan status fisik meliputi sifat materi, tegangan yang terjadi pada materi (*internal stress*) dan hubungan antara gaya dan deformasi yang terjadi.

**II.4 Pemantauan Deformasi Menggunakan Teknik CRP (Close Range Photogrammetry)**

Pemantauan deformasi dilakukan dengan cara mengamati perubahan koordinat objek sebagai fungsi dari waktu. Besarnya perubahan bagian-bagian pada objek tersebut dinyatakan melalui pengukuran koordinat-koordinatnya secara tiga dimensi. Pemantauan deformasi menggunakan teknik CRP pada prinsipnya tidak berbeda dengan metode geodetik lainnya, yakni dengan melakukan pengamatan terhadap perubahan koordinat titik objek dengan cara melakukan pengukuran pada waktu yang berbeda. Dari setiap pengamatan diperoleh koordinat titik-titik objek sehingga selanjutnya dapat dihitung vektor pergeseran (Hanifa, 2007). Ilustrasi vektor pergeseran dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Vektor Pergeseran

**II.5 Pemodelan 3D**

Pemodelan adalah membentuk suatu benda-benda atau objek, membuat dan mendesain objek tersebut sehingga terlihat seperti bentuk aslinya. Sesuai dengan objek dan basisnya, proses ini secara keseluruhan dikerjakan didalam komputer. Keseluruhan objek dapat diperlihatkan secara 3 dimensi melalui konsep dan proses desain, sehingga banyak yang menyebut hasil ini sebagai pemodelan 3D. Model 3D dapat terbentuk, menggunakan metode *image based rendering*, *image based modelling*, *range based modelling*, maupun *combination of image and range based modeling*. Hasil pemodelan 3D menggunakan teknik *image based modelling* yang pelaksanaannya menggunakan teknik *close range photogrammetry* (Nalwan dalam Sujadi, 2018).

Menurut Faegnell (2018) model 3D dapat dibagi menjadi tiga kategori antara lain sebagai berikut:

1. *Solid Model*

*Solid Model* melibatkan pengerjaan dengan bentuk yang telah ditentukan sebelumnya, seperti kubus, silinder, bola dan polihedron lainnya untuk menambah fitur atau mengurangi material. Model ini biasanya digunakan dalam aplikasi berbasis mekanik dan konstruksi, dimana parameter spesifik, pengukuran dan bentuk lebih ditekankan.

2. *Surface Model*

*Surface model* merupakan cangkang tipis yang tidak memiliki massa atau volume. *Surface model* bekerja

dengan vektor dan garis singgung, memanipulasi bentuk dengan tarikan dan dorongan (umumnya ketika garis singgung berpotongan) dengan bentuk model yang lebih bebas atau cair di alam. Model ini dapat dengan mudah diputar dan ditekuk.

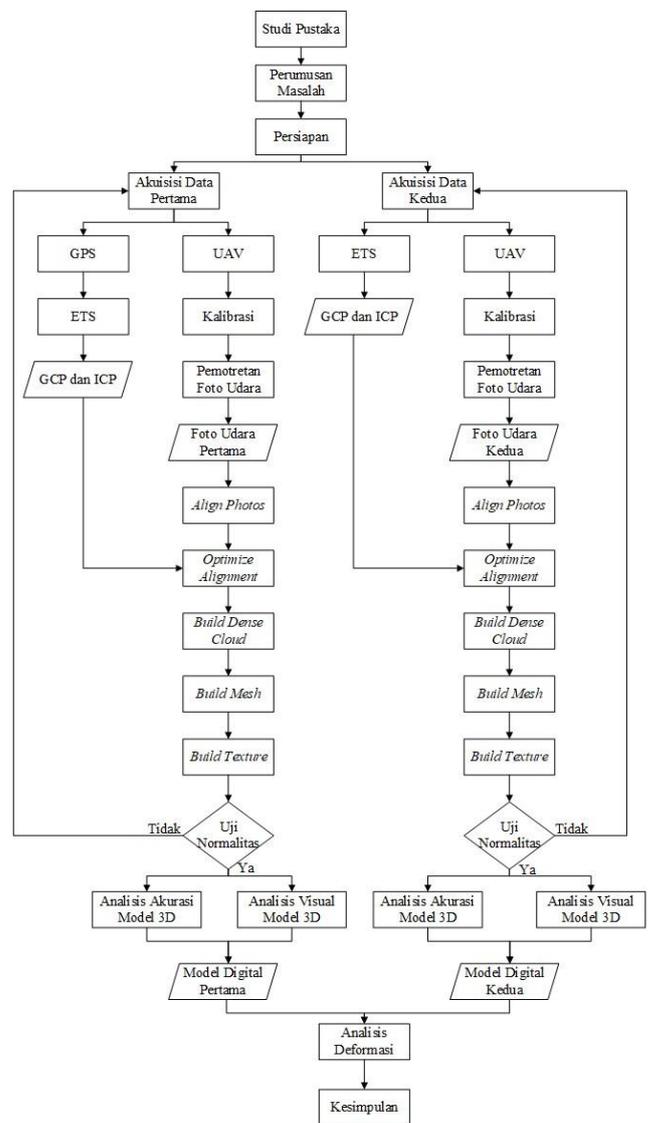
3. *Mesh model*

*Mesh model* mirip dengan *surface model*. Namun, setiap permukaan melengkung pada *mesh model* tidak seperti permukaan vektor yang sangat halus pada *surface model*. *Mesh model* terdiri dari banyak poligon segitiga datar. Poligon ini dapat dianggap sebagai "piksel", dengan setiap objek memiliki resolusi yang ditentukan. Dengan kata lain, semakin banyak poligon, semakin halus objek yang muncul. Namun, ketika diperbesar, akan terlihat bahwa poligon yang membentuk permukaan melengkung adalah datar.

**III. Metodologi Penelitian**

**III.1 Diagram alir**

Diagram alir proses penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Tahapan Penelitian

**III.2 Tahap Pendahuluan**

1. Studi Literatur

Studi literatur merupakan kegiatan yang wajib dilakukan peneliti untuk memperdalam materi serta memperluas pengetahuan dalam mengkaji tema penelitian baik melalui penelitian terdahulu maupun literatur lain sehingga bisa digunakan sebagai referensi dalam melaksanakan penelitian.

2. Survei Lokasi Penelitian

Survei lokasi penelitian dilakukan untuk mengetahui keadaan objek penelitian, mengetahui kondisi dilapangan sekitar objek penelitian, sehingga memperoleh gambaran tentang bagaimana mekanisme pengambilan foto dan akuisisi data lapangan.

3. Perijinan Lokasi Penelitian

Perijinan lokasi penelitian dilakukan untuk mendapatkan izin dari pihak terkait serta menjamin legalitas saat melakukan penelitian di lokasi studi, baik ketika akuisisi foto maupun pengukuran terestris.

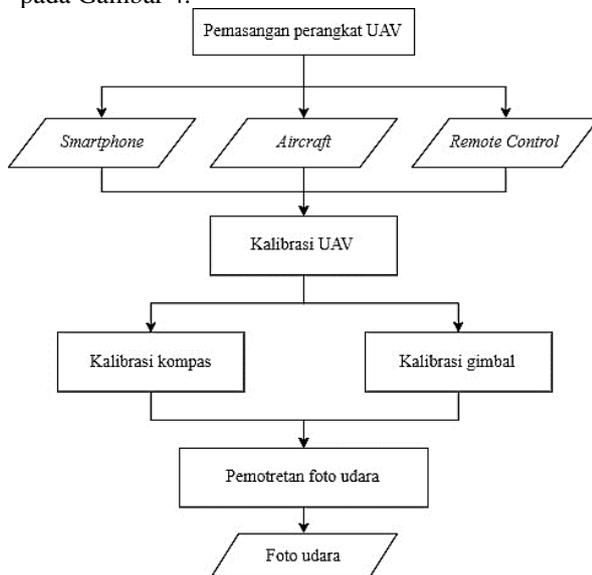
4. Persiapan dan Pengadaan Alat

Persiapan dan pengadaan alat berupa memeriksa kondisi alat yang digunakan dalam penelitian seperti UAV (badan pesawat, *propeller*, baterai, *SD card*, *charger*, dan *controller*), ETS (baterai dan *charger*) GPS, reflektor, statif dan pita ukur.

**III.3 Tahap Akuisisi Data**

**III.3.1 Akuisisi Data Foto Udara**

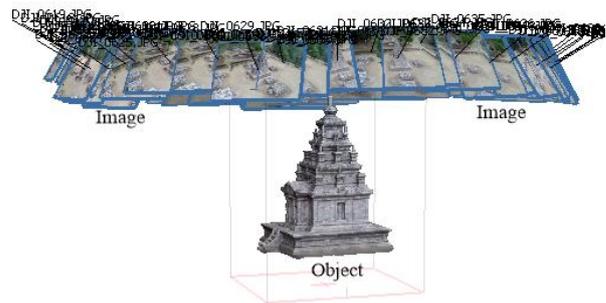
Diagram alir akuisisi foto udara dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Diagram alir akuisisi foto udara

Akuisisi foto udara menggunakan UAV tidak dilakukan secara otomatis atau dengan fitur *Point of Interest* (POI) pada aplikasi DJI GO, sehingga pemotretan dilakukan secara manual dengan mengelilingi objek penelitian. Hal ini dikarenakan kondisi lokasi penelitian yang memiliki banyak pohon tinggi dan kondisi angin yang tidak stabil, sehingga untuk menghindari gangguan jalur terbang UAV maka akuisisi foto dilakukan secara manual. Pemotretan foto

udara Candi Gedong Songo dapat dilihat pada Gambar 5.

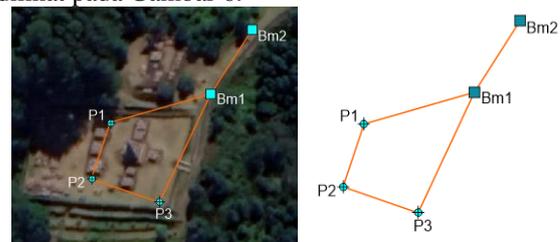


Gambar 5 Pemotretan foto udara

**III.3.2 Akuisisi Data Pengukuran Lapangan**

1. Poligon

Pengukuran poligon dilakukan menggunakan alat ukur ETS (*Electronic Total Station*). Hasil pengukuran digunakan untuk mengikatkan koordinat tanah terhadap model. Poligon yang digunakan merupakan poligon tertutup diikatkan pada dua titik acuan untuk mendapatkan azimut. Sketsa pengukuran poligon dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Sketsa Poligon

2. Titik Detail

Pengukuran titik detail dilakukan dengan menggunakan ETS *reflectorless* untuk mendapatkan koordinat model sebenarnya dilapangan yang akan digunakan untuk transformasi koordinat model digital menjadi koordinat sebenarnya.

**III.3.3 Akuisisi Data GPS**

Pengukuran GPS dilakukan untuk mendapatkan koordinat titik ikat buatan pada 2 titik dengan menggunakan GPS Hiper SR selama kurang lebih 4 jam yang diikatkan dengan data CORS UDIP. Koordinat titik ikat digunakan sebagai acuan dalam bentuk BM1 dan BM2 pada pengukuran poligon untuk mendapatkan azimut.

**III.3.4 Akuisisi Data Kalibrasi Kamera UAV**

Kalibrasi dilakukan dengan menghubungkan *drone* dengan *remote control* yang sudah terhubung juga dengan *smartphone*, kemudian masuk ke mode kamera pada aplikasi DJI GO. Kalibrasi kamera dilakukan dengan memotret bidang kalibrasi berupa *chessboard* yang disediakan oleh perangkat lunak Agisoft Lens. Hasil kalibrasi lensa kamera berupa nilai parameter internal kamera UAV.

III.4 Pengolahan Data

III.4.1 Data GPS

Data GPS diolah dengan menggunakan perangkat lunak Topcon Tools dan Rinx Converter. Hasil dari pengolahan Data GPS dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Koordinat Titik Ikat

Titik	Koordinat		
	X (m)	Y (m)	Z(m)
BM 1	9203693,005	426962,582	1419,551
BM2	9203709,939	426973,467	1419,291
CORS UDIP	9220591,529	438140,773	255,838

III.4.2 Data Pengukuran Lapangan

1. Poligon

Tabel 3 Koordinat Titik Poligon

Titik	Koordinat		
	X(m)	Y(m)	Z(m)
BM1	426962,582	9203693,005	1419,551
P1	426936,469	9203686,869	1419,179
P2	426931,735	9203670,868	1419,125
P3	426948,445	9203662,94	1419,057

Koordinat titik poligon berjumlah 4 dengan titik yang diketahui BM1 dan BM2 untuk mendapatkan azimuth sehingga dapat menentukan koordinat titik P1, P2 dan P3.

2. Detail

Koordinat titik detail berjumlah 23 buah untuk yang tersebar pada setiap sisi candi.

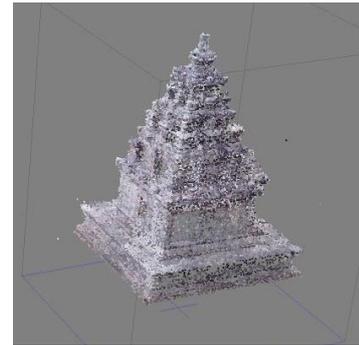
Tabel 4 Koordinat Titik Detail

Titik	Koordinat		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
SKAT1	426938,640	9203677,493	1420,155
SKIT1	426938,815	9203678,467	1420,145
SKAD1	426938,186	9203675,396	1420,154
SKID1	426939,275	9203680,682	1420,171
SKAB1	426943,920	9203673,938	1420,167
SKIB1	426945,214	9203679,182	1420,169
SBBK	426943,971	9203673,880	1419,106
APKI	426939,658	9203678,970	1422,251
APKA	426939,152	9203676,636	1422,201
SAPKA	426939,799	9203676,458	1422,210
SPKAB	426939,465	9203677,473	1420,498
SPKAA	426939,478	9203677,467	1421,922
SPKIB	426939,571	9203678,060	1420,482
SKIAJB	426943,481	9203676,572	1421,580
SKAAJB	426943,592	9203677,038	1421,574
SKABJB	426943,621	9203677,044	1420,751
SKAAJK	426941,836	9203675,567	1421,724
SKIAJK	426941,342	9203675,639	1421,738
SKABJK	426941,332	9203675,652	1420,712
SKAD2	426939,717	9203675,841	1422,205
SKAB2	426943,338	9203674,908	1422,195
SKIB2	426944,239	9203678,567	1422,230
SKID2	426940,523	9203679,545	1422,281

III.4.3 Data UAV

1. Align Photos

Proses *Align Photos* bertujuan untuk mengetahui posisi kamera saat pemotretan dan membentuk *sparse point cloud* dari setiap foto yang saling berinterseksi. Hasil dari proses *Align Photos* dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Align Photos

2. Optimize Alignment

Tujuan dari *optimize alignment* adalah mengoptimisasi posisi kamera setelah dilakukannya transformasi koordinat. Koordinat GCP dan ICP dapat dilihat pada Tabel 5 dan 6.

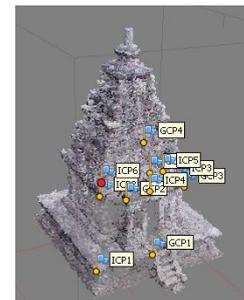
Tabel 5 GCP

Titik	Koordinat		
	X(m)	Y(m)	Z(m)
GCP1	426938,815	9203678,467	1420,145
GCP2	426939,683	9203679,021	1422,248
GCP3	426939,152	9203676,636	1422,201
GCP4	426943,338	9203674,908	1422,195
GCP5	426943,920	9203673,938	1420,167

Tabel 6 ICP

Titik	Koordinat		
	X(m)	Y(m)	Z(m)
ICP1	426939,275	9203680,682	1420,171
ICP2	426940,523	9203679,545	1422,251
ICP3	426939,799	9203676,458	1422,210
ICP4	426943,971	9203673,880	1419,106
ICP5	426941,342	9203675,639	1421,738
ICP6	426943,621	9203677,044	1420,751

Distribusi GCP dan ICP model dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8 Distribusi GCP dan ICP

3. Build Dense Cloud

Proses *build dense cloud* bertujuan untuk memadatkan *sparse point cloud* menjadi *point cloud* yang rapat/*dense point cloud*. Hasil dari proses *build dense cloud* dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9 Build Dense Cloud

4. Build Mesh

Proses *build mesh* bertujuan untuk membentuk permukaan dari hasil *dense point cloud* menggunakan poligon berbentuk segitiga datar. Hasil *build mesh* dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10 Build Mesh

5. Build Texture

*Build texture* merupakan tahapan untuk membentuk tekstur pada permukaan objek hasil rekonstruksi 3D. Pembentukan tekstur bertujuan untuk membuat permukaan lebih tajam dan detail hingga membentuk permukaan model yang sebenarnya sehingga terciptanya model 3D yang baik. Hasil *build texture* dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11 Build Texture

IV. Hasil dan Pembahasan

IV.1 Analisis Pengukuran Poligon

Berdasarkan perhitungan data poligon didapatkan hasil sebagai berikut:

1. Jarak total (D) = 95,229 m
2. Koreksi sumbu X = 0,006 m
3. Koreksi sumbu Y = 0,008 m

4. Kesalahan penutup sudut = 9”/4
5. Kesalahan linear (fl) = 1 : 9.324,745

Tabel 7 Spesifikasi teknis jaring titik kontrol Orde-4 (Badan Standarisasi Nasional, 2002)

Orde-4 (Poligon)	
Metode pengolahan data	Hitung perataan kuadrat terkecil metode parameter atau metode <i>bowditch</i>
Salah penutup sudut	$\leq 10\sqrt{n}$ , dimana n adalah jumlah titik poligon
Salah penutup linier jarak	$\leq 1/6.000$

Berdasarkan hasil perhitungan dapat disimpulkan kesalahan penutup sudut dan penutup linier jarak sudah memenuhi toleransi dan dapat dilanjutkan untuk analisis selanjutnya.

IV.2 Analisis Model 3D

1. Analisis Visual Model 3D

Perbandingan visual antara model sebenarnya dan model digital dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12 Model sebenarnya dan model digital

Candi Gedong Songo memiliki detail yang cukup kompleks, mulai dari bentuk maupun susunan batuan, hingga adanya relief pada bagian jendela kanan candi. Bagian tubuh candi juga terdapat ornamen-ornamen yang menambah nilai arsitektur candi. Rekonstruksi model 3D memerlukan parameter dengan kualitas tinggi (*high quality*) untuk membentuk model kompleks yang representatif. Tingkat detail pada model digital cukup baik karena mampu merepresentasikan detail candi yang kompleks mirip seperti model sebenarnya.



Gambar 13 Model digital pertama (kiri) dan model digital kedua (kanan)

Model digital pertama cenderung memiliki tingkat kecerahan yang lebih tinggi dibandingkan

model digital kedua, hal ini dipengaruhi oleh data foto udara dari masing-masing model. Kondisi lapangan saat akuisisi foto udara pada model pertama memiliki cahaya yang cukup terang pada siang hari, dengan jumlah awan tidak terlalu banyak. Berbeda dengan akuisisi pertama, kondisi cahaya pada akuisisi data kedua dihalangi oleh awan sehingga menghalangi jalan masuknya cahaya. Kondisi ini mempengaruhi kontras dan kecerahan foto hasil pemotretan menggunakan UAV, sehingga saat rekonstruksi 3D menghasilkan model digital yang berbeda antara model digital pertama dengan model digital kedua.

**2. Analisis Perbandingan Jarak**

Analisis akurasi model dilakukan dengan perbandingan jarak antara model sebenarnya (ETS) dan model digital melalui analisis geometrik model, yaitu koordinat X, Y dan Z model. Selisih jarak antara model digital pertama dengan model sebenarnya dapat dilihat pada Tabel 8.

**Tabel 8** Perbandingan jarak ETS dengan model digital pertama

Jarak	ETS 1 (m)	Model 1 (m)	Selisih (m)
SKID1-SKIT1	2,262	2,261	0,001
SKAT1-SKAD1	2,146	2,161	0,015
SKAB1-SBBK	1,064	1,062	0,002
APKI-APKA	2,389	2,391	0,002
APKA-SAPKA	0,671	0,665	0,006
SPKAA-SPKAB	1,424	1,428	0,004
SPKAB-SPKIB	0,596	0,592	0,004
SKAD1-SKAB1	5,923	5,919	0,004
SKAB1-SKIB1	5,402	5,410	0,008
SKID1-SKIB1	6,126	6,113	0,013
SKAAJB-SKABJB	0,824	0,828	0,004
SKIAJB-SKAAJB	0,478	0,480	0,002
SKIAJK-SKABJK	1,026	1,023	0,003
SKAAJK-SKIAJK	0,499	0,494	0,005
SKAD2-SKAB2	3,739	3,736	0,003
SKAB2-SKIB2	3,769	3,765	0,004
SKIB2-SKID2	3,843	3,828	0,015

Nilai tertinggi dari hasil perbandingan jarak antara hasil pengukuran ETS dengan jarak pada model digital pertama yaitu jarak SKAT1-SKAD1 (Sisi depan kanan candi) dan SKIB2-SKID2 (Panjang sisi lt2 kiri) sebesar 0,015 (15 mm). Sedangkan untuk nilai terendah terdapat pada SKID1-SKIT1 yaitu sebesar 0,001 meter (1 mm). Hasil perbandingan jarak dengan pengukuran ETS dan model digital pertama sudah cukup baik karena selisih dari keseluruhan jarak berada pada satuan milimeter. Selisih jarak antara model digital kedua dengan model digital sebenarnya dapat dilihat pada Tabel 9.

**Tabel 9** Perbandingan jarak ETS dengan model digital kedua

Jarak	ETS 2 (m)	Model 2 (m)	Selisih (m)
SKID1-SKIT1	2,262	2,263	0,001

**Tabel 9** Perbandingan jarak ETS dengan model digital kedua (lanjutan)

Jarak	ETS 2 (m)	Model 2 (m)	Selisih (m)
SKAT1-SKAD1	2,142	2,161	0,019
SKAB1-SBBK	1,066	1,068	0,002
APKI-APKA	2,388	2,391	0,003
APKA-SAPKA	0,674	0,667	0,007
SPKAA-SPKAB	1,422	1,424	0,002
SPKAB-SPKIB	0,601	0,597	0,004
SKAD1-SKAB1	5,929	5,926	0,003
SKAB1-SKIB1	5,404	5,407	0,003
SKID1-SKIB1	6,125	6,111	0,014
SKAAJB-SKABJB	0,832	0,834	0,002
SKIAJB-SKAAJB	0,478	0,483	0,005
SKIAJK-SKABJK	1,021	1,022	0,001
SKAAJK-SKIAJK	0,507	0,502	0,005
SKAD2-SKAB2	3,736	3,733	0,003
SKAB2-SKIB2	3,767	3,771	0,004
SKIB2-SKID2	3,841	3,827	0,014

Nilai tertinggi dari hasil perbandingan jarak antara hasil pengukuran ETS dengan jarak pada model digital kedua yaitu jarak SKAT1-SKAD1 (Sisi depan kanan candi) sebesar 0,019 meter (19 mm). Sedangkan untuk nilai terendah terdapat pada SKID1-SKIT1 (Sisi depan kiri candi) yaitu sebesar 0,001 meter (1 mm). Hasil perbandingan jarak dengan pengukuran ETS dan model digital kedua sudah cukup baik karena selisih dari keseluruhan jarak berada pada satuan milimeter.

**IV.3 Analisis Uji Statistik Model**

**1. Uji Normalitas Model Pertama**

Hasil uji normalitas Kolmogorov-Smirnov untuk model pertama dapat dilihat pada Gambar 14.

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test		
		Unstandardized Residual
N		17
Normal Parameters <sup>a,b</sup>	Mean	.0000000
	Std. Deviation	.00711076
Most Extreme Differences	Absolute	.129
	Positive	.073
	Negative	-.129
Test Statistic		.129
Asymp. Sig. (2-tailed)		.200 <sup>c,d</sup>

a. Test distribution is Normal.  
 b. Calculated from data.  
 c. Lilliefors Significance Correction.  
 d. This is a lower bound of the true significance.

**Gambar 14** Uji normalitas model pertama

Hasil uji normalitas model pertama didapat standar deviasi sebesar 0,00711 dan *Asymp.Sig (2-tailed)* sebesar 0,200. Uji normalitas Kolmogorov-Smirnov dilakukan dengan tingkat kepercayaan 95%. Syarat untuk memenuhi normalitas adalah signifikansi > 0,05. Hasil signifikansi (0,200) > 0,05, maka dapat disimpulkan bahwa data perbandingan jarak model digital pertama dengan model sebenarnya terdistribusi secara normal sehingga dapat dilanjutkan untuk analisis selanjutnya.

2. Uji Normalitas Model Kedua

Hasil uji normalitas Kolmogorov-Smirnov untuk model kedua dapat dilihat pada Gambar 15.

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test		
		Unstandardized Residual
N		17
Normal Parameters <sup>a,b</sup>	Mean	.0000000
	Std. Deviation	.00732956
Most Extreme Differences	Absolute	.146
	Positive	.142
	Negative	-.146
Test Statistic		.146
Asymp. Sig. (2-tailed)		.200 <sup>c,d</sup>
a. Test distribution is Normal. b. Calculated from data. c. Lilliefors Significance Correction. d. This is a lower bound of the true significance.		

Gambar 15 Uji normalitas model kedua

Hasil uji normalitas model kedua didapat standar deviasi sebesar 0,007329 dan *Asymp.Sig (2-tailed)* sebesar 0,200. Uji normalitas Kolmogorov-Smirnov dilakukan dengan tingkat kepercayaan 95% dengan syarat untuk memenuhi normalitas adalah signifikansi > 0,05. Hasil signifikansi (0,200) > 0,05, maka dapat disimpulkan bahwa data perbandingan jarak model digital kedua dengan model sebenarnya terdistribusi secara normal sehingga dapat dilanjutkan untuk analisis selanjutnya.

IV.4 Analisis Deformasi

Analisis geometrik dilakukan untuk mengetahui besarnya vektor pergeseran titik yang dianalisis. Analisis geometrik dilakukan untuk mengetahui vektor pergeseran yang diuji pada 23 titik detail model yang dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 10 Analisis geometrik model

Kode	Vektor Pergeseran (mm)		Pergeseran	Deformasi
	Sebelum transformasi	Sesudah transformasi		
SKAT1	3	3	Ya	Tidak
SKIT1	4	4	Ya	Tidak
SKAD1	7	4	Ya	Tidak
SKID1	14	5	Ya	Tidak
SKAB1	14	6	Ya	Tidak
SKIB1	14	5	Ya	Tidak
SBBK	6	3	Ya	Tidak
APKI	11	2	Ya	Tidak
APKA	8	3	Ya	Tidak
SAPKA	7	5	Ya	Tidak
SPKAB	8	5	Ya	Tidak
SPKAA	10	5	Ya	Tidak
SPKIB	1	3	Ya	Tidak
SKIAJB	6	2	Ya	Tidak
SKAAJB	7	2	Ya	Tidak
SKABJB	13	5	Ya	Tidak
SKAAJK	4	5	Ya	Tidak
SKIAJK	8	3	Ya	Tidak
SKABJK	6	1	Ya	Tidak
SKAD2	8	4	Ya	Tidak
SKAB2	4	3	Ya	Tidak
SKIB2	5	5	Ya	Tidak
SKID2	3	7	Ya	Tidak
Rata-rata	7,43	3,91		

Hasil transformasi koordinat pada model menghasilkan akurasi model sekitar 0,0084 m. Oleh karena itu, titik yang dideteksi deformasi merupakan titik yang bernilai lebih besar dari 0,0084 m atau 8,4

mm. Hasil vektor pergeseran dari 23 titik uji memiliki nilai tertinggi 7 mm dan nilai terendah 1 mm dengan rata-rata 3,91 mm yang menunjukkan bahwa titik uji tidak mengalami deformasi meskipun terdapat pergeseran yang masih dalam rentang akurasi model. Model pertama dan kedua dengan rentang waktu 3 bulan dapat disimpulkan tidak mengalami deformasi.

V. Penutup

V.1 Kesimpulan

Berdasarkan proses, hasil, dan analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil rekonstruksi model 3D dengan menggunakan metode fotogrametri rentang dekat/ *close range photogrammetry* dapat digunakan sebagai pendokumentasian untuk konservasi maupun pemugaran bangunan bersejarah. Rekonstruksi model 3D menggunakan perangkat lunak Agisoft menghasilkan model yang cukup baik dalam merepresentasikan model sebenarnya yang dapat ditinjau berdasarkan hasil analisis kesesuaian visual, bentuk maupun ukuran.
2. Analisis uji model dilakukan dengan menggunakan perbandingan jarak model digital dengan model sebenarnya menggunakan ETS dengan selisih hasil tertinggi pada model pertama sebesar 0,015 mm dan 0,019 mm pada model kedua. Uji statistik yang dilakukan pada model adalah uji normalitas Kolmogorov-Smirnov. Hasil dari uji normalitas menunjukkan bahwa data perbandingan jarak ETS dan model digital pertama dan kedua adalah berdistribusi normal dengan standar deviasi model pertama sebesar 0,007110 dan 0,007329 pada model kedua. Signifikansi yang dimiliki kedua model adalah sama yaitu sebesar 0,200. Hasil dari analisis deformasi adalah bahwa dengan ketelitian alat yang dimiliki oleh ETS tanpa reflektor ± 10 mm menunjukkan bahwa selisih jarak antara model pertama dan kedua masih pada rentang akurasi ETS dengan nilai tertinggi 5 mm dan rata-rata sebesar 1,53 mm. Signifikansi dari perbandingan selisih kedua model adalah 0,200 dan terdistribusi normal dengan tingkat kepercayaan 95%, sehingga dapat disimpulkan bahwa tidak terjadi deformasi pada Candi Gedong Songo untuk waktu pengambilan 4 Juli dan 4 Oktober 2019 (3 Bulan).

V.2 Saran

Berdasarkan proses yang sudah dilakukan pada penelitian ini, agar penelitian selanjutnya dapat dikaji lebih baik, maka penulis menyampaikan saran sebagai berikut :

1. Sebelum melakukan penelitian, pastikan lokasi objek penelitian tidak menyulitkan untuk pengambilan data seperti jarak tempuh maupun aksesibilitas ke lokasi penelitian.
2. Pengukuran kerangka dasar sebaiknya menggunakan alat yang sudah dikuasai cara penggunaannya.

3. Waktu penerbangan *drone* untuk akuisisi foto sebaiknya pada siang hari dengan kondisi tidak berawan untuk menghindari bayangan pada objek serta penyamaan jam pemotretan untuk pengambilan waktu pertama dan kedua.
4. Pemotretan foto menggunakan *drone* sebaiknya menggunakan fitur Point of Interest untuk mendapatkan jarak antar foto yang lebih teratur, namun harus memperhatikan kondisi lapangan juga.
5. Pengolahan foto untuk rekonstruksi model 3D sebaiknya menggunakan komputer dengan spesifikasi yang tinggi sehingga memudahkan pengolahan dan pembentukan model yang lebih baik.
6. Analisis deformasi sebaiknya dilakukan tidak hanya pada objek namun juga pada kerangka kontrol yaitu dengan pengamatan GPS pada titik acuan (*benchmark*) secara temporal untuk mengetahui apakah titik acuan tersebut juga terdeformasi, sehingga tidak hanya memperhatikan deformasi pada objek melainkan pada kerangka kontrol juga.
7. Jangka waktu pengambilan data sebaiknya lebih lama agar deformasi dapat dilihat

**Pustaka dari Internet**

Faegnell, D. (2018): *Solid, Surface and Mesh 3D Design Formats Explained*.  
<https://3dprinterchat.com/solid-surface-and-mesh/>, diakses pada tanggal 28 Oktober 2019.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Atkinson, K. B. (1996): *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, Caithness: Whittles Publishing.
- Bone, E. dan Christopher, B. (2003): *Unmanned Aerial Vehicles: Background and Issues for Congress*. Report for Congress.
- Chen, Y.Q. dan Chrzanowski, A. (1980): *An Overview of The Physical Interpretation of Deformation Measurement*. Canada :Departement of Surveying Engineering, University of New Brunswick.
- Eisenbeiss, H. (2009): *UAV Photogrammetry*. Zürich : ETH Zürich
- Jefferson, D. B., Yudo, P. dan Bandi, S. (2015): *Aplikasi Fotogrametri Jarak Dekat untuk Pemodelan 3D Lawang Sewu*. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Hanifa, N. R. (2007): *Studi Penggunaan Kamera Digital Low Cost Non-Metric Auto-Focus untuk Pemantauan Deformasi*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Moffit, H. dan Mikhail, M. (1980): *Photogrammetry*. Newyork: Harper Row Publisher
- Sujadi, D., M.Edwin, T. dan Silvester, S. S. (2018): *3D modelling obyek kerapatan tinggi menggunakan metode fotogrametri jarak dekat (studi kasus: patung pandawa perumahan pandawa, kota malang)*. Malang: Institut Teknologi Nasional Malang.

**Peraturan Perundangan :**

Undang-Undang No. 11 Tahun 2010 Tentang Cagar Budaya.