

REKONSTRUKSI MODEL 3D CANDI JAWI DENGAN METODE *STRUCTURE FROM MOTION (SfM) FOTO UDARA*

Yuwono, Danar Guruh Pratomo, Yulita Eka Rana Mulyono

*Teknik Geomatika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
Email: yuwono@geodesy.its.ac.id*

Abstrak. Candi merupakan salah satu wujud kekayaan budaya bangsa yang perlu dijaga, dilestarikan, dan dikelola secara tepat. Sebagai cagar budaya, keberadaan candi memiliki peran penting terkait dengan pemahaman dan pengembangan sejarah, ilmu pengetahuan, dan budaya bangsa Indonesia. Candi Jawi terletak di Desa Candi Wates, Kecamatan Prigen, Pasuruan, Jawa Timur merupakan salah satu bangunan cagar budaya yang telah mengalami pemugaran berkali-kali dari tahun 1938 sampai 1980. Pada penelitian ini Candi Jawi didokumentasi dan dimodelkan secara tiga dimensi dengan menggunakan metode *Structure from Motion (SfM)*.

Pendokumentasian candi dilakukan dengan metode fotogrametri menggunakan kamera resolusi tinggi yang dipasang di wahana udara tanpa awak (*Unmanned Aerial Vehicle-UAV*). Pemodelan candi secara 3D dilakukan dengan metode *SfM*. Metode ini menggunakan foto udara dengan overlap tinggi untuk menghasilkan struktur tiga dimensi dari Candi Jawi. Pada metode *SfM* diperoleh nilai *RMSE GCP* sebesar 0.033m dan nilai *RMSE ICP* sebesar 0.030m. Pada penelitian ini, titik-titik *GCP* dan *ICP* merupakan titik-titik yang bergeoreferensi dengan ketelitian kurang dari 0.5m. Titik-titik kontrol tersebut diukur dengan menggunakan *GPS* tipe geodetik. Hasil pemodelan tiga dimensi Candi Jawi yang dibuat pada penelitian ini mempunyai tingkat *Level of Detail (LoD)* 3, yang merepresentasikan efek visual eksterior candi.

Kata kunci : Candi Jawi, Foto Udara, *LoD*, *SfM*

1. Pendahuluan

Candi merupakan salah satu warisan budaya yang perlu dijaga dan dilestarikan karena memiliki nilai sejarah dan ilmu pengetahuan. Salah satu bentuk perhatian dan perlindungan terhadap candi, sebagai bangunan cagar budaya di Indonesia, adalah dengan melakukan pendokumentasian secara sistematis. Dokumentasi yang baik terhadap bangunan cagar budaya membuat pelestarian dan pemanfaatannya akan dapat terus dilakukan, meskipun benda fisiknya sudah hilang atau musnah. Pemanfaatan cagar budaya dapat terus dilakukan apabila dokumen mengenai bangunan tersebut tersimpan secara lengkap dan terstruktur dalam bentuk deskripsi, gambar, foto, maupun film^[1].

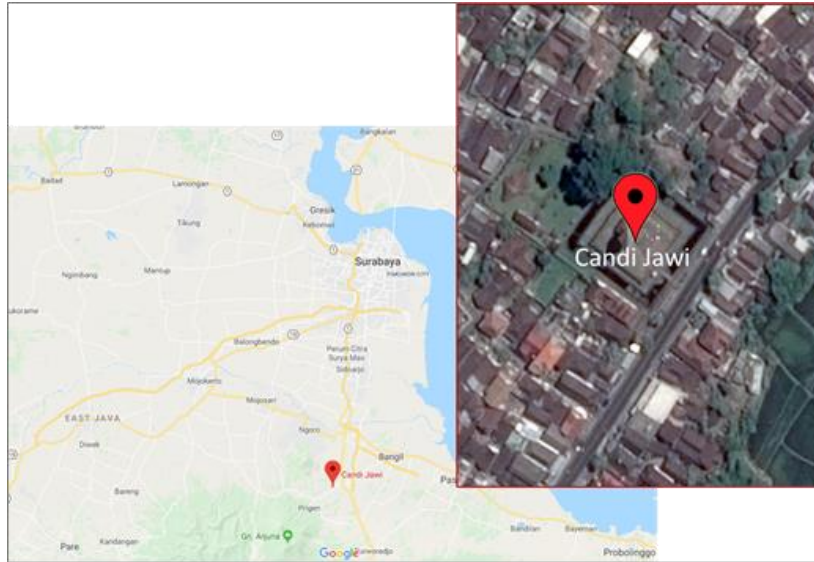
Candi Jawi terletak di kaki Gunung Welirang, tepatnya di Desa Candi Wates, Kecamatan Prigen, Kabupaten Pasuruan, sekitar 31 km dari kota Pasuruan. Candi ini merupakan situs kerajaan Singhasari yang merupakan tempat penyimpanan abu dari raja terakhir Singhasari, Kertanegara. Candi Jawi mengalami beberapa kali pemugaran. Pada tahun 1938-1941, Candi Jawi dipugar oleh pemerintah Hindia Belanda dari kondisinya yang sudah runtuh. Pemugaran kembali dilakukan pada tahun 1975-1980. Namun demikian pemugaran candi tersebut masih belum sempurna, karena masih banyak batu dan arca yang hilang^[2].

Pada penelitian ini Candi Jawi direkonstruksi melalui pemodelan tiga dimensi menggunakan foto udara dengan *overlap* tinggi. Rekonstruksi ini dilakukan mengingat candi tersebut pernah runtuh dan pernah dilakukan pemugaran. Selain untuk dokumentasi, hasil rekonstruksi model tiga dimensi dari Candi Jawi dapat dimanfaatkan juga hal pendidikan dan pariwisata^[3]. Beberapa penelitian terkait dengan dokumentasi cagar budaya melalui pemodelan tiga dimensi telah dilakukan di Indonesia. Suwardi dkk (2015) berhasil melakukan rekonstruksi Candi Borobudur dengan menggunakan *fixed-wing UAV* untuk menghasilkan model tiga dimensi Candi Borobudur. Model tiga dimensi dari Candi Singosari di Malang telah dibuat melalui penelitian Hidayat dan Cahyono (2015) dan Putra dan Handayani (2016). Bayuaji, Suprayogi dan Sasmito (2015) telah mendefinisikan bentuk tiga dimensi dari Gereja Blenduk di Semarang. Pada penelitian ini Candi Jawi dibangun model tiga dimensinya

dengan menggunakan metode *Structure from Motion* (SfM) ^[4] . Model 3D yang dihasilkan memiliki tingkat *Level of Detail* (LoD) 3 dimana akurasi yang diperbolehkan kurang dari 0,5m.

2. Metode Kegiatan

Candi Jawi terletak di Desa Candi Wates, Kecamatan Prigen, Kabupaten Pasuruan, Jawa Timur. Lokasi penelitian berada di kaki Gunung Welirang, sekitar 31 km dari Kota Pasuruan. Secara geografis Candi Jawi terletak pada koordinat $-7.6624998^{\circ}\text{LS}$, $112.6677564^{\circ}\text{BT}$. Lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 25. Lokasi Candi Jawi di Kabupaten Pasuruan

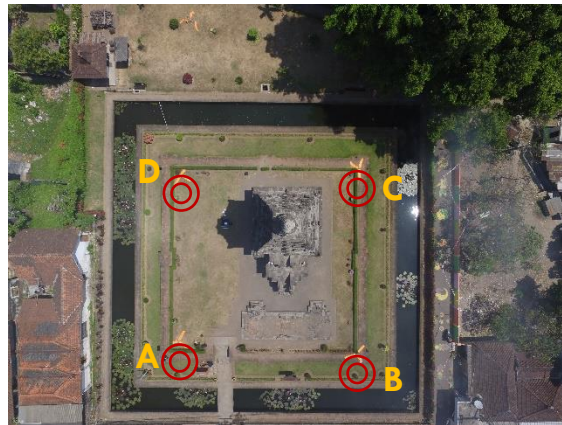
Pada penelitian ini, Candi Jawi difoto dari berbagai sisi dengan overlap antar foto yang tinggi. Pengambilan foto candi dilakukan dengan menggunakan kamera non-metrik Sony Exmor 12.4 MP. Untuk mendapatkan foto candi dari berbagai sisi, digunakan wahana udara tanpa awak DJI Phantom 3. Wahana udara tanpa awak ini memiliki tipe rotary wing dengan 4 sayap (quadcopter).

Titik kontrol tanah (*Ground Control Point-GCP*) dan titik-titik kontrol uji (*Independent Control Point-ICP*) diukur dengan GPS tipe geodetik. Pengukuran titik-titik kontrol tersebut dilakukan dengan metode statik secara radial, dimana satu *receiver* sebagai *base* yang terdapat di dalam wilayah situs Candi Jawi dan dua *receiver* lainnya digunakan sebagai *rover*. Lama pengamatan untuk titik GCP adalah 1 jam dan untuk ICP 15 menit, sedangkan untuk perekaman data dilakukan setiap 1 detik.

Untuk mendapatkan model tiga dimensi yang bergeoreferensi, dilakukan proses *georeferencing* koordinat dengan menggunakan koordinat GCP dan ICP hasil pengukuran lapangan. Validasi terhadap bentuk dan dimensi candi dilakukan dengan menggunakan hasil pengukuran lapangan yang dilakukan dengan menggunakan distometer. Hasil pemodelan tiga dimensi dari penelitian ini memiliki tingkat LoD 3, sehingga toleransi yang diberikan adalah sebesar 0.5 m.

3. Hasil dan Pembahasan

Jumlah titik GCP yang digunakan pada penelitian ini adalah 4 buah. Titik-titik tersebut terletak mengelilingi Candi Jawi membentuk poligon tertutup. Titik-titik ini digunakan sebagai acuan untuk melakukan pengolahan data GPS di titik-titik ICP yang terletak pada badan Candi Jawi. Sebaran Titik Kontrol Tanah pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.



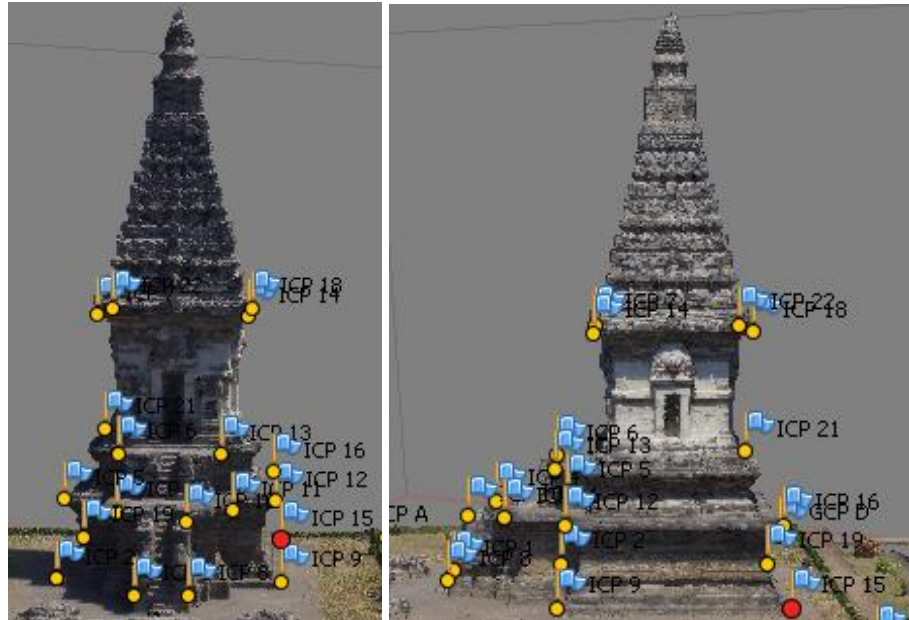
Gambar 26. Sebaran Posisi Titik Kontrol Tanah (GCP)

Koordinat titik-titik GCP dapat dilihat pada Tabel 1. Dari pengukuran tersebut, diperoleh nilai RMSE horisontal sebesar 0.033m dan RMSE vertikal sebesar 0.015m.

Tabel 5. Tabel Koordinat Titik Kontrol Tanah (GCP)

Id	Easting (m)	Northing (m)	Elevation (m)
Base	684159,176	9152661,315	312,896
A	684195,086	9152634,199	314,663
B	684210,872	9152652,922	314,669
C	684190,389	9152668,248	314,648
D	684176,694	9152647,705	314,676

Koordinat titik-titik GCP yang diperoleh dari pengukuran GPS, selanjutnya digunakan sebagai acuan untuk memperoleh koordinat titik-titik ICP yang terletak pada badan Candi Jawi. Pengamatan GPS dengan metode statik singkat dilakukan untuk memperoleh koordinat titik-titik ICP tersebut. Sebaran titik-titik ICP dapat dilihat pada Gambar 3 sedangkan untuk koordinat titik-titik ICP dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 27. Sebaran Titik Kontrol Uji (ICP) Pada Badan Candi Jawi

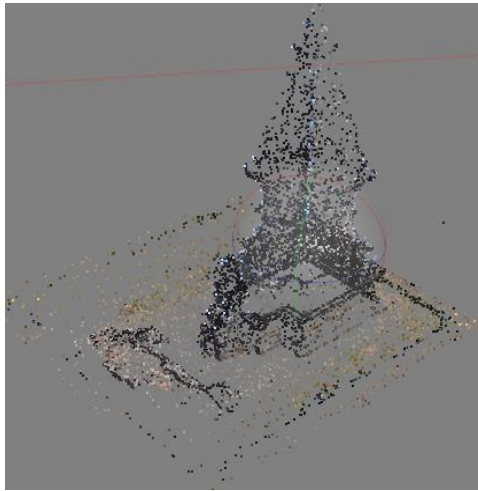
Tabel 6. Tabel Koordinat Titik Kontrol Uji (ICP)

Point Id	Easting (m)	Northing (m)	Elevation (m)
ICP 1	684197.4680	9152649.4548	315.4104
ICP 2	684191.5496	9152649.2577	315.0334
ICP 3	684196.9627	9152650.6965	318.2632
ICP 4	684195.4607	9152649.9149	318.4117
ICP 5	684191.5045	9152649.6729	318.3583
ICP 6	684193.2179	9152651.3112	320.3726
ICP 7	684191.2590	9152651.4416	326.0682
ICP 8	684198.7573	9152651.2329	315.4336
ICP 9	684197.1330	9152656.9639	315.0064
ICP 10	684197.9787	9152651.5821	318.1780
ICP 11	684197.7231	9152654.0001	318.3533
ICP 12	684196.7309	9152656.9210	318.3571
ICP 13	684195.7571	9152654.7928	320.4312
ICP 14	684195.0834	9152656.6342	326.0293
ICP 15	684189.4912	9152662.5726	314.9970
ICP 16	684189.5501	9152662.0505	318.3486
ICP 17	684189.6501	9152659.3166	321.2974
ICP 18	684189.8955	9152660.4379	326.0799
ICP 19	684183.9519	9152654.9565	315.0283
ICP 20	684187.6082	9152658.0975	319.3732
ICP 21	684185.5857	9152655.1656	320.4073
ICP 22	684186.0728	9152655.2380	326.0762

Pada metode SfM ini diperoleh nilai RMSE titik GCP sebesar 0.033 m dan nilai RMSE titik ICP yang sudah bergeoreferensi sebesar 0.030 m. Berdasarkan deskripsi akurasi *Level of Detail* (LoD) yang disampaikan oleh Beljecki (2013), maka ketelitian model 3 dimensi Candi Jawi dari segi bentuk dengan metode SfM adalah berada pada tingkat LoD 3.

Pengolahan data foto menjadi model 3D Candi Jawi dengan metode SfM melewati beberapa tahapan, diantaranya yaitu *Alignment Photos*, *Build Dense Cloud*, *Build Mesh*, dan *Texturing*. Tahap

Alignment Photos adalah tahapan mensejajarkan foto yang telah diperoleh dari wahana untuk membentuk *tie point*^[7]. Jumlah foto yang digunakan pada penelitian ini adalah sebanyak 223 buah. Hasil dari proses *Alignment Photos* dapat dilihat pada Gambar 4.



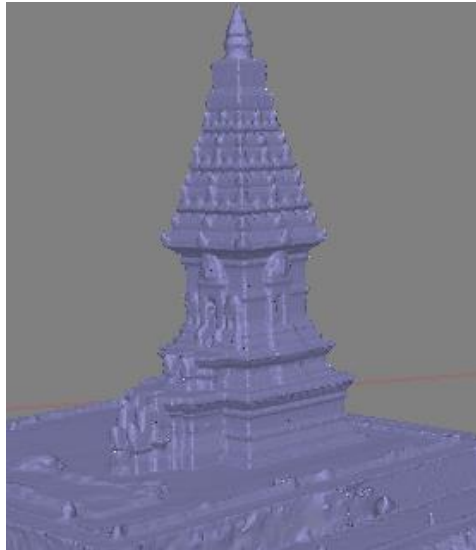
Gambar 28. Hasil Proses *Alignment Photos*

Setelah dilakukan proses *Alignment Photos*, dilakukan proses *Build Dense Cloud*. Pada proses ini dilakukan interpolasi titik-titik kesegarisan hasil dari *space resection* agar membentuk suatu objek yang berupa *point clouds*. Hasil proses *Build Dense Cloud* dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 29. Hasil Proses *Build Dense Cloud*

Tahapan berikutnya adalah melakukan pemodelan 3D dari *point clouds* yang dihasilkan dari tahapan sebelumnya. Pada tahap ini, kumpulan *tie points* yang belum saling mengikat satu sama lain, dilakukan pengikatan dengan susunan *tie points* yang saling tertutup (membentuk suatu bidang permukaan). Pada proses ini dibentuk model 3D yang berupa *Triangular Irregular Network* (TIN). Hasil yang diperoleh dari tahap *Build Mesh* dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 30. Hasil Proses *Build Mesh*

Tahapan terakhir dari penelitian ini adalah proses *Texturing* yaitu pengambilan nilai RGB dari masing-masing foto (*image matching*) yang diperoleh dari *point clouds* dan kemudian dituangkan ke model TIN (hasil dari *Build Mesh*) sehingga warna dan tekstur dari objek penelitian dapat mendekati objek sebenarnya^[8]. Pada Gambar 7 dapat dilihat hasil dari proses *Texturing*.



Gambar 31. Hasil Proses *Texturing*

4. Kesimpulan

Pemodelan 3D Candi Jawi merupakan proses dokumentasi candi sebagai wujud kepedulian, perlindungan, dan perawatan bangunan bersejarah. Dokumentasi yang diperoleh dapat disimpan sebagai arsip yang dapat dimanfaatkan jika sewaktu-waktu terjadi kerusakan pada candi yang disebabkan oleh alam maupun manusia., dan sebagai wisata edukasi bagi masyarakat tentang sejarah beserta peninggalannya di masa lalu yang patut dipelajari dan dilestarikan. Adapun hasil dari kegiatan ini adalah pendokumentasian bentuk geometri Candi Jawi sudah berhasil dilakukan dan hasil model tiga dimensinya juga sudah dapat terbentuk menyerupai bentuk asli objek di lapangan.

Ketelitian model berdasarkan nilai RMSE Titik Kontrol Uji tiga dimensi model Candi Jawi sebesar 0.030 meter ialah berada pada Level of Detail (LoD) 3 yaitu mampu memvisualkan bentuk fisik/eksterior model objek. Metode yang digunakan untuk memodelkan Candi Jawi secara tiga dimensi memiliki kelebihan (a) proses akuisisi dan pemrosesan data relatif cepat dan kedetailan

bentuk model objek adalah baik karena dapat mencakup berbagai sudut objek penelitian, (b) Komposisi warna model objek yang mampu mendekati aslinya karena didapatkan dari nilai RGB foto, (c) penyajian data lebih cepat karena dapat menyesuaikan resolusi output data yang diinginkan serta telah membentuk satu kesatuan point cloud model objek secara utuh. Adapun kekurangan metode SfM ini adalah dalam kualitas model tiga dimensi dan tingkat LoD yang dihasilkan akan sangat bergantung pada tingkat resolusi kamera yang digunakan, dan data foto yang diperoleh serta dipakai dalam pembuatan model tiga dimensi dari objek cagar budaya tersebut.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan untuk penelitian selanjutnya adalah akuisisi data foto sebaiknya dilakukan pada saat siang hari (ketika matahari berada tepat di atas). Hal ini untuk menghindari bayangan yang terbentuk karena akan mempengaruhi interpretasi foto dalam penempatan Titik Kontrol Uji pada model tiga dimensi objek penelitian ketika proses pengolahan foto. Pengambilan data sebaiknya dilakukan menggunakan fungsi autopilot agar overlap dan sidelap data foto udara sesuai dengan rencana dan jalur terbang sehingga dapat diperoleh data foto yang seragam.

Ucapan Terima Kasih

Terimakasih penulis ucapkan kepada LPPM (Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat) ITS, PT EXSOL TRIMITRA, PT NPC LABORATORIUM INDONESIA serta seluruh pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan kegiatan dan penyusunan makalah ini.

Daftar Pustaka

- [1]. Sutopo, Marsis. 2014. Merekam Jejak Masa Lalu Cagar Budaya Dalam Perspektif 3D. Magelang: Balai Konservasi Borobudur Direktorat Jenderal Kebudayaan Kmenterian Pendidikan dan Kabudayaan.
- [2]. Perpusnas. RI. 2014. Candi Jawi. Diakses dari Perpusnas RI: [http://candi.perpusnas.go.id/temples/deskripsi-jawa_timur-candi_jawi], diakses pada tanggal 20 Oktober 2017 pukul 12.41.
- [3]. Sutopo, Marsis. 2014. Merekam Jejak Masa Lalu Cagar Budaya Dalam Perspektif 3D. Magelang: Balai Konservasi Borobudur Direktorat Jenderal Kebudayaan Kmenterian Pendidikan dan Kabudayaan.
- [4]. Naufatunnisa, Selfi. 2017. Pemodelan 3 Dimensi Candi Wringinlawang Menggunakan Metode Structure From Motion Untuk Dokumentasi Cagar Budaya. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [5]. Biljecki, F. 2013. The Concept of Level of Detail. Netherlands: TU Delft.
- [6]. Kurniasih, D. 2015. Kajian Historis Candi Wringin Lawang di Desa Jatipasar Kecamatan Trowulan Kabupaten Mojokerto sebagai Pintu Masuk Sebuah Komplek Bangunan. Kediri: Program Studi Pendidikan Sejarah Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Nusantara PGRI.
- [7]. Girod, B. 2013. Digital Image Processing. California: Standford University.
- [8]. Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M.J., & Reynolds, J. M. 2012. 'Structure-from-motion' photogrammetry : a low cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 300-314.
- [9]. Fraser, C. 2015. *Advances in Close Range Photogrammetry*. Wichman/VDE Verlag, Berlin & Offenbach, 257-268.
- [10]. Hidayat, H dan Cahyono, A. B. 2015. 3D Reconstruction of Singosari Temple Using Terrestrial Images and Structure From Motion Algorithm. *ICOIRS 2015*.
- [11]. Putra, A. R dan Handayani, H. H. 2016. 3D Modelling Using Structure From Motion And Terrestrial Laser Scanning (Case Study : Singosari Temple, Malang). Surabaya : Geomatics Engineering Departement, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [12]. Suwardhi, D dkk. 2015. Digital 3D Borobudur : Integration of 3D Surveying and Modeling Techniques. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XL-5/W7.
- [13]. Bayuaji RA, Suprayogi A, dan Sasmito B. 2015. Aplikasi Fotogrametri Jarak Dekat Untuk Pemodelan 3D Gereja Blenduk Semarang. *Jurnal Geodesi Undip*, Vol 4, No 2.