

REKONSTRUKSI DIGITAL BANGUNAN CANDI SINGOSARI DENGAN METODE STRUCTURE FROM MOTION

DIGITAL RECONSTRUCTION OF SINGOSARI TEMPLE USING STRUCTURE FROM MOTION METHODS

Husnul Hidayat, Agung Budi Cahyono

Jurusan Teknik Geomatika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Email: hidayat@geodesy.its.ac.id

Abstrak

Candi Singosari adalah salah satu bangunan cagar budaya yang ada di Indonesia. Candi ini terletak di Kecamatan Singosari, Kabupaten Malang, Jawa Timur pada jarak 9 kilometer dari Kota Malang ke arah Surabaya. Candi ini diperkirakan dibangun sekitar tahun 1300-an dan pernah direstorasi oleh pemerintah kolonial Belanda pada tahun 1934-1937. Saat ini terdapat beberapa bagian bangunan yang tidak lengkap. Melihat sejarah dan kondisi candi saat ini, maka usaha dokumentasi bangunan ini menjadi penting, tidak hanya untuk bidang arkeologi dan arsitektur, tetapi juga pendidikan dan pariwisata. Penelitian ini mencoba untuk melakukan dokumentasi digital bangunan tersebut melalui rekonstruksi model digital 3 dimensi (3D). Data utama yang digunakan adalah 39 foto bangunan yang diambil dari darat menggunakan kamera digital. Selanjutnya model 3D direkonstruksi berdasarkan metode *Structure from Motion*. Agar model 3D yang dihasilkan memiliki ukuran, posisi, dan orientasi yang benar dilakukan pula proses georeferensi dengan bantuan titik kontrol yang koordinat absolutnya telah disurvei secara terestris. Untuk menguji ketelitian geometrik model 3D, dilakukan uji pengukuran dimensi candi dan koordinat 3D titik-titik sampel yang dibandingkan dengan data hasil pengukuran terestris. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan menggunakan foto terestrial model 3D yang dihasilkan masih kurang lengkap. Secara visual dinding candi dapat dimodelkan dengan baik. Namun bagian atap dan pelataran candi tidak dapat dimodelkan karena tidak adanya kenampakan candi dari atas. Sedangkan dari segi akurasi geometrik, rata-rata kesalahan posisi adalah 0,068 m. Sedangkan rata-rata kesalahan pengukuran panjang adalah 0,057 m.

Kata Kunci: Candi Singosari, *Structure from Motion*, model 3 dimensi

Abstract

Singosari temple is one of cultural heritage building in Indonesia. This temple is located in Singosari District, Malang Regency, East Java, about 9 kilometers from Malang City to Surabaya. This temple is predicted to be built in 1300s and has been restored by Dutch colonial government in 1934-1937. Today, there are some incomplete parts at the temple. Due to its history and recent condition, the documentation of this building becomes so important not only for archaeological purposes, but also education and tourism. This research aims to make documentations about this temple by digital 3D model reconstruction. The main data which used in this research are 39 terrestrial images of the temple which were taken with digital camera. Then, the 3D model was reconstructed using Structure from Motion algorithm. In order to make a 3D model with correct dimension, position, and orientation, the georeferencing process was done with aid from control points which have known absolute coordinate obtained from terrestrial surveying. To check the geometric accuracy of 3D model, the accuracy test was carried out by comparing the coordinates from 3D model and length measurement with corresponding real values from terrestrial surveying. The result shows that with only terrestrial images the generated 3D model was still incomplete. Visually the walls can be modeled well. But the top and floor can't be modeled due to lack coverage from the top. In terms of geometric accuracy, the mean 3D positional error is 0.068 m. And the mean of error in length measurement is 0.057 m.

Keywords: Singosari temple, Structure from Motion, 3D model

PENDAHULUAN

LatarBelakang

Indonesia memiliki banyak bangunan warisan budaya. Keberadaan bangunan-bangunan ini

menjadi penting dalam konteks sejarah dan peradaban karena merupakan bukti perkembangan ilmu dan teknologi dari masa silam. Dikarenakan oleh umur dan kerentanannya,

pengarsipan dan pendokumentasian bangunan-bangunan ini menjadi penting dalam proses rekonstruksi maupun restorasi, misalnya apabila bangunan mengalami kerusakan akibat banjir, kebakaran, perang, gempa Bumi, dan sebagainya (Alshawabkeh, 2006).

Salah satu bangunan cagar budaya yang ada di Indonesia adalah Candi Singosari yang terletak di Kecamatan Singosari, Kabupaten Malang, Jawa Timur. Para arkeolog memprediksi bahwa candi ini diperkirakan dibangun pada tahun 1300-an sebagai penghormatan untuk raja Kertanegara dari Singosari. Bangunan ini pernah direstorasi pemerintah kolonial Belanda pada tahun 1937. Terdapat sebutan lain untuk candi ini: Candi Cungkup dan Candi Menara, yang menunjukkan bahwa candi ini merupakan candi tertinggi pada masanya dibandingkan dengan bangunan lain di sekitarnya (<http://candi.pnri.go.id/>). Candi ini berukuran 13,85×13,85 meter dengan tinggi 14,10 meter. Bagian puncak candi tidak terbentuk dengan sempurna. Sedangkan dinding candi memuat sedikit sekali relief. Hal ini menunjukkan kemungkinan pembangunan candi tidak terselesaikan. Namun di daerah Singosari hanya candi ini yang masih tersisa dan menjadi salah satu objek wisata di Kabupaten Malang. Dengan demikian konservasi dan dokumentasi bangunan ini menjadi sangat penting.



Gambar 1. Candi Singosari

Salah satu metode dokumentasi bangunan cagar budaya adalah fotogrametri jarak dekat yang dipelopori oleh Meydenbauer pada tahun 1858 (Alberts, 2001). Metode ini banyak diterapkan dalam dokumentasi bangunan bersejarah (Yastikli, 2007; Harintaka dkk, 2008). Metode ini dianggap cocok karena cara pengukurannya yang meminimalisasi kontak dengan objek yang diamati. Dengan demikian metode ini dapat mengurangi potensi kerusakan yang disebabkan oleh kecerobohan dalam pengukuran. Hasil

penggunaan metode ini umumnya adalah dimensi mendetail dari bangunan yang dapat digunakan untuk pembuatan gambar 3 dimensi (3D). Metode ini menjadi semakin baik dengan pesatnya perkembangan dalam dunia *computer vision* yang membuat rekonstruksi objek 3D berdasarkan citra 2 dimensi mampu memberikan hasil yang sangat mendetail. Salah satu metode terbaru yang dikembangkan adalah *Structure from Motion* (SfM) (Westoby dkk, 2012).

Keuntungan utama dari metode ini adalah ia dapat menggunakan banyak foto yang diambil dengan sembarang kamera digital dan memiliki tingkat otomasi yang tinggi dalam seluruh prosesnya. Selain itu, karena metode ini menggunakan foto sebagai data utamanya, maka informasi warna dan tekstur dapat diperoleh dengan sangat baik. Karena metode ini dapat menggunakan sembarang foto digital yang diambil dengan sembarang kamera, metode ini dapat diimplementasikan dengan biaya rendah, contohnya untuk pemetaan topografi (Westoby dkk, 2012). Namun kekurangan metode ini adalah model 3D yang dihasilkan tidak memiliki ukuran, posisi, dan orientasi yang benar pada permukaan Bumi sehingga masih kurang cocok untuk tujuan pemetaan. Dengan demikian proses survey terestrial tetap dibutuhkan untuk mentransformasi model 3D menjadi model 3D bergeoreferensi yang memiliki dimensi, posisi, dan orientasi yang benar pada permukaan Bumi. Makalah ini menjelaskan bagaimana model 3D bergeoreferensi Candi Singosari dapat dibuat dari foto-foto objek dengan metode SfM dan survey terestris. Hasil dan analisis ketelitian kemudian didiskusikan lebih lanjut.

METODOLOGI PENELITIAN

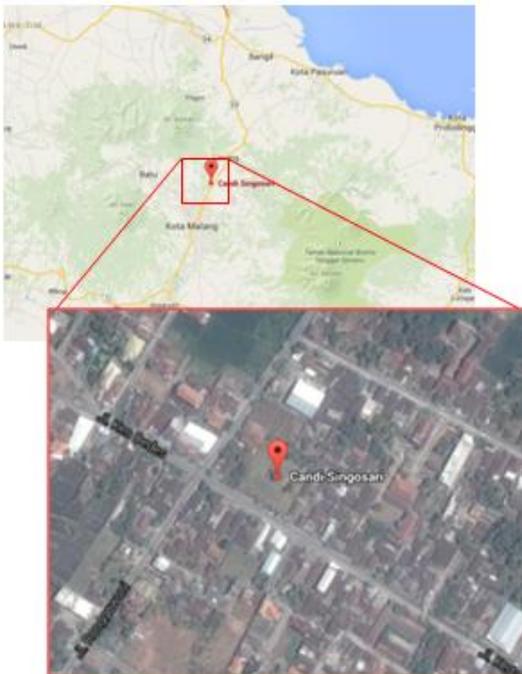
Lokasi Penelitian

Candi Singosari terletak di Desa Candi Renggo, Kecamatan Singosari, Kabupaten Malang, Jawa Timur. Candi ini berlokasi kurang lebih 9 kilometer dari Kota Malang ke arah Surabaya, 500 meter dari jalan raya Surabaya-Malang ke arah barat (Gambar 2). Walaupun candi ini berlokasi ditengah-tengah permukiman, candi dapat dicapai dengan mobil maupun bus. Di lokasi candi terdapat patung Syiwa yang menunjukkan bahwa candi ini adalah candi Hindu. Tinggi candi adalah 14,10 meter dengan kaki candi berukuran 8,8×8,8

meter (BPCB Mojokerto, 2015). Saat ini Candi Singosari menjadi salah satu objek wisata di Kabupaten Malang.

Akuisisi Data Foto

Peralatan utama yang digunakan dalam pemotretan objek adalah kamera digital Canon Powershot SX260 HS. Foto-foto diambil dengan resolusi 12 MP dan panjang fokus 4 mm pada jarak kurang lebih 15 meter dari candi. Untuk memastikan setiap sisi candi dapat terpotret dengan baik, pengambilan foto dilakukan secara konvergen.



Gambar 2. Lokasi penelitian
(<http://maps.google.com>)



Gambar 3. Contoh foto terestrial Candi Singosari

Pada penelitian ini ada 39 foto yang diambil dari segala arah. Dengan demikian sudut perpotongan sumbu optik 2 foto yang berdekatan adalah kurang lebih 9 derajat dengan *base/height ratio* sekitar 0,16. Basis foto yang pendek ini menjamin adanya pertampalan yang sangat cukup sebagaimana yang diperlukan oleh algoritma SfM (Westoby dkk, 2012).

Survey Titik Kontrol dan Pengukuran Objek

Karena algoritma SfM mengekstraksi posisi kamera dan koordinat titik dalam sistem koordinat relatif, maka model 3D yang dihasilkan harus ditransformasi ke dalam sistem koordinat absolut. Dalam banyak kasus, transformasi antarsistem koordinat dapat dilakukan dengan transformasi konform 3D dengan beberapa titik kontrol (GCP: *Ground Control Point*) yang koordinat absolutnya diketahui (Westoby dkk, 2012). Untuk melakukannya maka diperlukan kegiatan survey terestris.

Titik kontrol yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan target alami yang lokasinya berada pada pojok-pojok bangunan candi. Hal ini dimaksudkan agar tidak dibutuhkan pemasangan titik target buatan pada tubuh candi, mengingat hal tersebut cukup sulit dilakukan terutama pada bagian atas candi di mana tim peneliti tidak diizinkan untuk menaiki candi. Kerangka koordinat terdiri dari 4 *benchmark* (BM) yang digunakan sebagai tempat mendirikan instrumen *Total Station*. Koordinat 2 BM di antaranya disurvey menggunakan metode differential GPS agar posisi dan orientasi kerangka koordinat diketahui dalam sistem koordinat UTM Zona 49 dengan ellipsoid WGS 1984, dengan sistem tinggi mengikuti tinggi ellipsoid. Koordinat GCP selanjutnya disurvey menggunakan *Total Station*. Selain mengukur koordinat GCP, tim peneliti juga mensurvey koordinat beberapa titik sampel uji pada tubuh candi. Sedangkan beberapa panjang bagian candi diukur dengan distometer. Pengukuran ini juga dimaksudkan untuk menganalisis apakah model 3D yang dihasilkan dapat memberikan hasil pengukuran yang akurat.

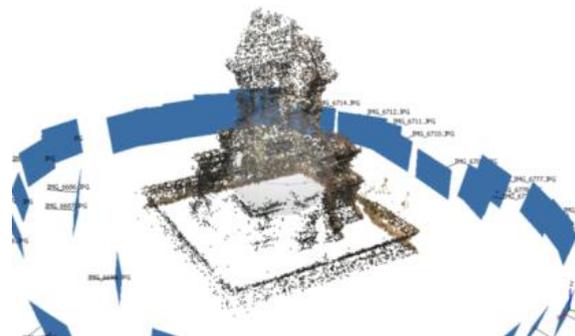
Image Matching dan Alignment

Algoritma *Structure from Motion* dimulai dengan tahap *image matching* dan *alignment*. Tujuan dari tahap ini adalah untuk menentukan posisi dan

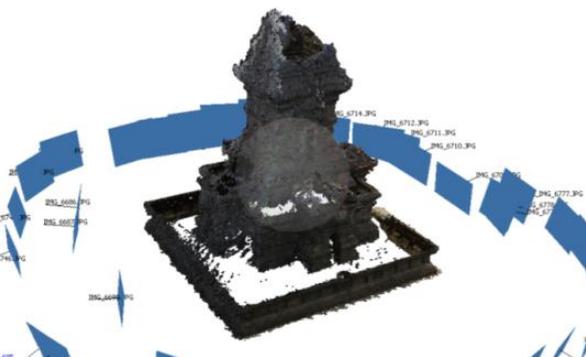
orientasi setiap foto pada saat pemotretan, yang nantinya akan digunakan untuk merekonstruksi model 3D objek. Pada tahap *image matching* dilakukan proses deteksi titik secara otomatis pada setiap foto. Kemudian dilakukan pencocokan titik sekutu (*tie points*) yang nampak pada lebih dari 1 foto. Dengan data korespondensi titik antar foto, selanjutnya dilakukan proses orientasi relatif antar foto sehingga posisi dan orientasi setiap foto dapat ditentukan relatif terhadap salah satu foto. Dengan informasi posisi dan orientasi tersebut, koordinat 3D *tie points* dapat ditentukan dan menghasilkan *sparse point cloud*. Kumpulan titik tersebut sudah dapat menggambarkan bentuk sebenarnya dari objek meskipun kurang mendetail.

Dense Reconstruction

Dengan informasi posisi dan orientasi setiap foto, tahap berikutnya adalah *dense reconstruction*. Pada tahap ini posisi titik-titik 3D yang ditentukan menjadi lebih banyak dibandingkan dengan proses *image matching* dan *alignment*. Proses ini dilakukan dengan teknik *digital image matching*.



Gambar 4. *Image matching* dan *alignment*



Gambar 5. *Dense point cloud*

Dengan informasi posisi dan orientasi setiap foto, maka geometri epipolar antarfoto dapat direkonstruksi. Geometri epipolar ini membuat

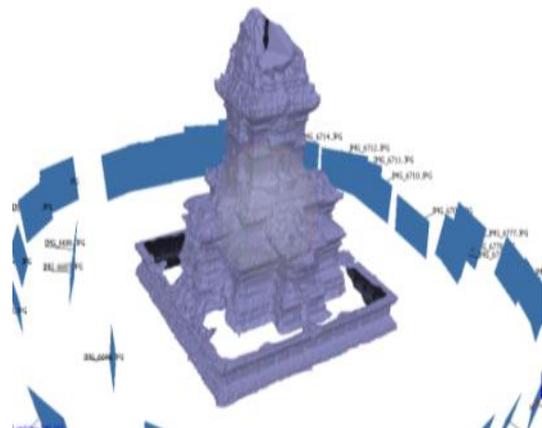
proses *image matching* dapat dilakukan lebih cepat karena proses pencocokan titik antarfoto dilakukan hanya pada garis epipolar (Wolf dan Dewitt, 2004). Hasil dari keseluruhan proses ini adalah *point cloud* dengan kerapatan yang lebih tinggi. Kumpulan titik ini mampu menggambarkan detail candi dengan kerapatan lebih tinggi. Namun demikian permukaan-permukaan yang terbentuk bukanlah permukaan kontinu, sehingga dibutuhkan proses pembentukan *mesh* agar terbentuk permukaan sempurna.

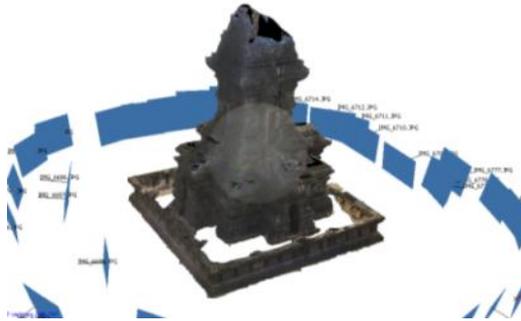
Meshing dan Texturing

Point cloud yang dihasilkan dari proses sebelumnya selanjutnya digunakan untuk membentuk model permukaan kontinu. Model permukaan dibentuk dengan pendekatan *Triangulated Irregular Networks* (TIN). Namun sebelumnya perlu dilakukan eliminasi titik-titik yang salah posisi. Titik-titik ini terletak terlalu jauh

dari perkiraan permukaan objek, yang disebabkan oleh proses *digital image matching* yang tidak akurat. Dengan demikian interpolasi bentuk permukaan yang benar dapat dilakukan.

Setelah permukaan model terbentuk, selanjutnya dilakukan proses pewarnaan berdasarkan foto objek. Warna dari foto diproyeksikan pada permukaan objek. Apabila sebuah titik pada permukaan objek terlihat pada lebih dari 1 foto, maka warna pada titik tersebut adalah kombinasi dari foto yang bersangkutan.





Gambar 6. 3D Mesh dan model 3D final

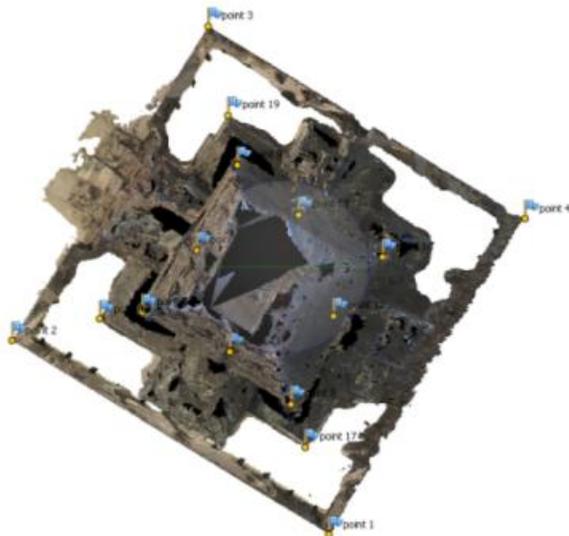


(b)

Gambar 7. Posisi titik cek GCP (titik 1-titik 5) dan titik cek (titik lainnya). (a) Tampak atas. (b) Tampak perspektif

Georeferensi

Telah disebutkan sebelumnya bahwa metode SfM hanya dapat merekonstruksi bentuk 3D dalam sembarang sistem koordinat. Proses georeferensi pada penelitian ini dimaksudkan untuk menghasilkan model 3D bergeoreferensi yang dihasilkan dari alur proses SfM. Proses georeferensi dilakukan menggunakan 5 GCP yang terletak pada beberapa titik pojok candi dengan berbagai variasi posisi. Selain titik GCP, terdapat pula titik cek (ICP: *Independent Check Point*) yang digunakan untuk menguji ketelitian posisi 3D yang dihasilkan.



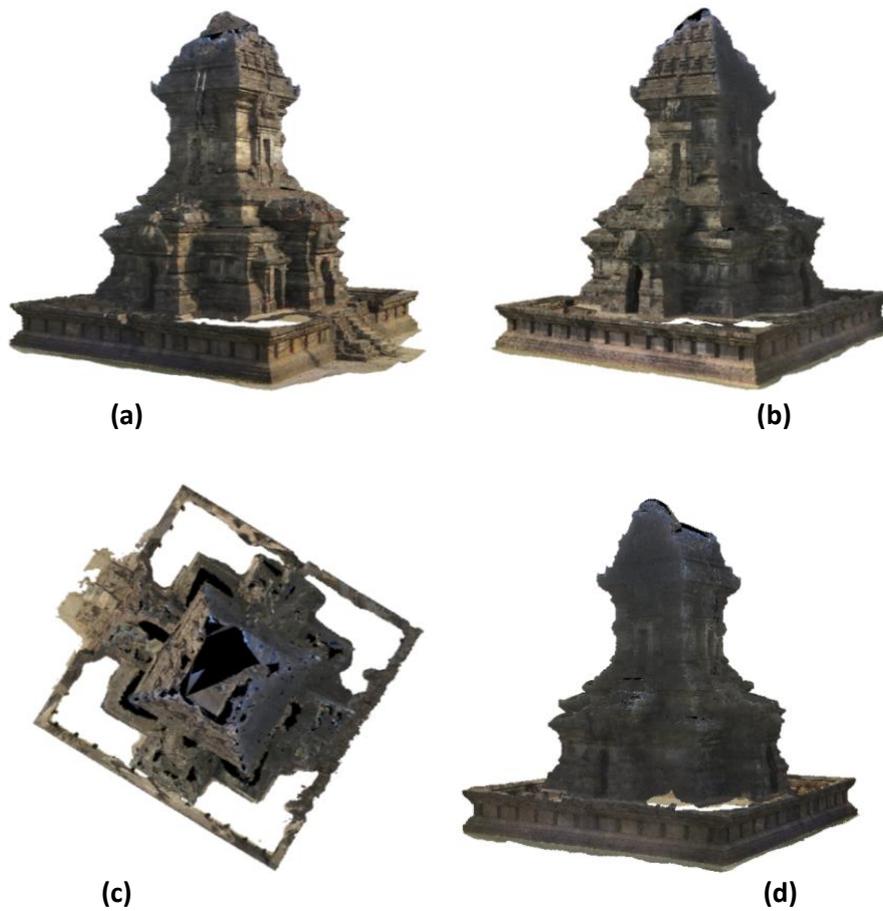
(a)

HASIL DAN PEMBAHASAN

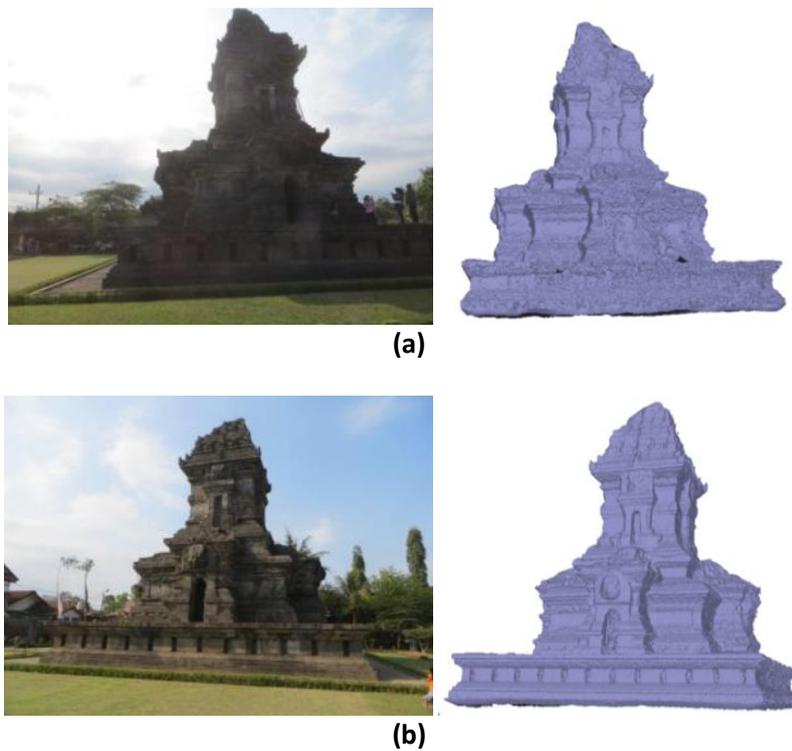
Model 3D Candi Singosari

Berdasarkan alur kerja metode SfM yang diterapkan pada penelitian ini, model 3D Candi Singosari telah dihasilkan. Model 3D yang dihasilkan mampu menampilkan semua fasad candi dengan detail yang baik. Namun ada kekurangan pada fasad belakang (sisi timur) di mana bentuk permukaan yang dihasilkan terlihat kasar bila dibandingkan dengan fasad lainnya. Hal ini disebabkan oleh efek *backlighting* yang membuat kenampakan titik-titik objek pada sisi tersebut menjadi kurang jelas. Akibatnya proses *digital image matching* menjadi kurang baik. Proses pemotretan candi dilakukan pada pukul 15.00 WIB, di mana matahari telah mengarah ke barat sehingga mengakibatkan bayangan pada sisi timur candi.

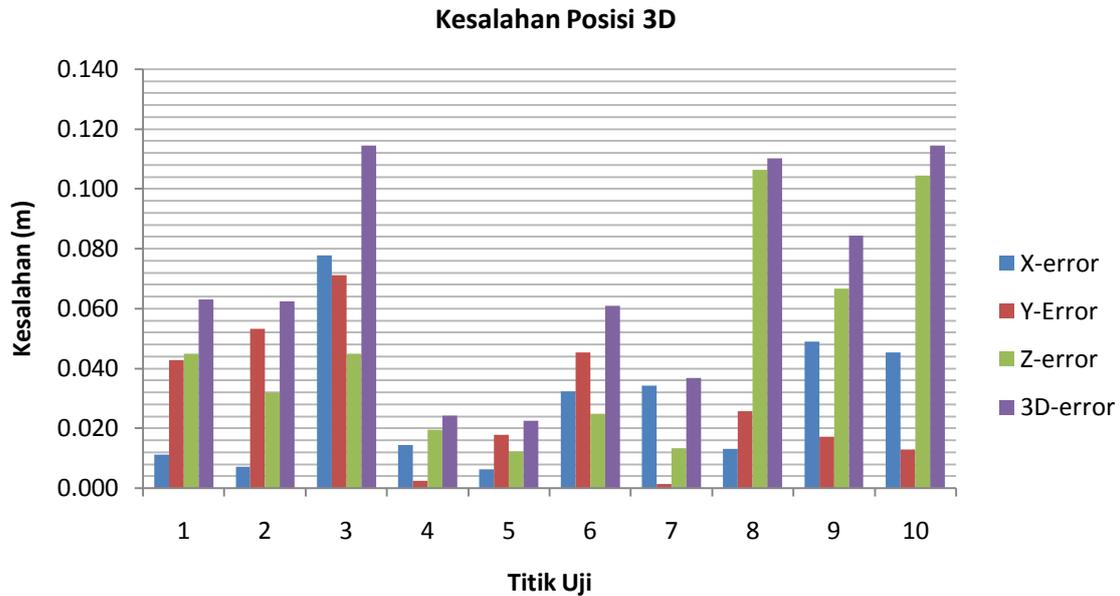
Model 3D yang dihasilkan pun belum terbentuk dengan sempurna. Bagian atap dan pelataran candi tidak dapat terbentuk dengan baik. Ini menunjukkan bahwa foto udara yang diambil dari atas candi juga diperlukan untuk membentuk model 3D yang lebih sempurna. Foto yang digunakan dapat berupa foto udara tegak maupun miring, misalnya yang diambil dengan bantuan wahana udara tanpa awak (UAV: *Unmanned Aerial Vehicle*) (Mozas-Calvache et al, 2012; Lo Brutto et al, 2014).



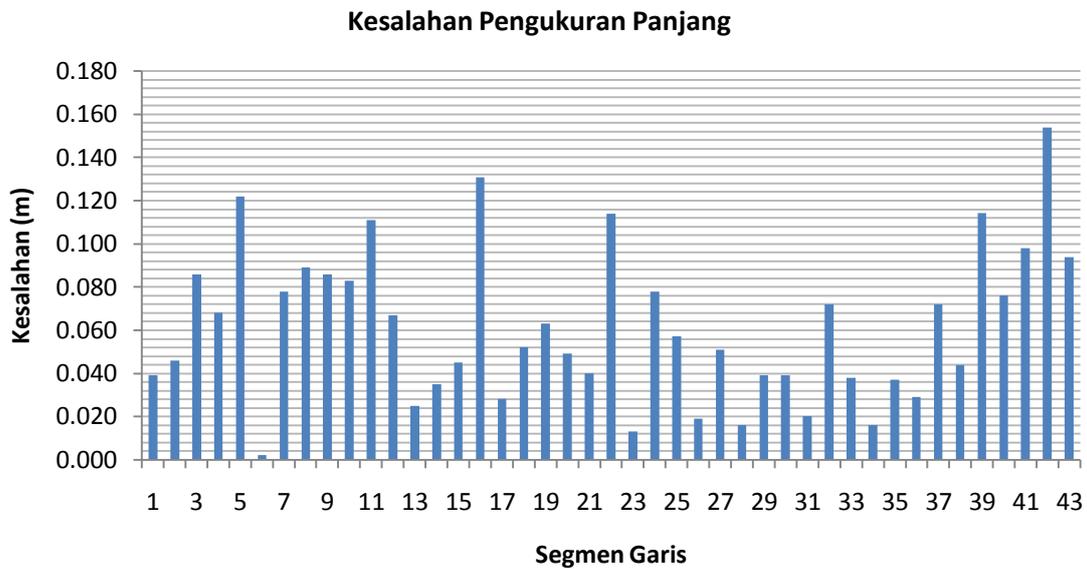
Gambar 8. Model 3D Candi Singosari. (a) Tampak utara. (b) Tampak selatan. (c) Tampak atas. (d) Tampak timur



Gambar 9. Efek backlighting dan pengaruhnya pada model permukaan 3D. (a) Fasad timur. (b) fasad selatan



Gambar 10. Kesalahan posisi 3D



Gambar 11. Kesalahan pengukuran panjang

Uji Ketelitian

Untuk menguji ketelitian proses pemodelan 3D, dilakukan uji perbandingan koordinat 3D dan panjang segmen garis yang diperoleh dari model 3D dengan data referensi yang diperoleh dari pengukuran terestris. Terdapat 10 titik uji yang digunakan untuk menguji ketelitian posisi 3D dan 43 segmen garis yang digunakan untuk menguji ketelitian ukuran.

Dari hasil pengujian diketahui bahwa rata-rata perbedaan posisi adalah $dX=0.029$ m; $dY=0.029$ m; $dZ=0.047$ m. Nilai ini sama dengan rata-rata perbedaan posisi 3D sebesar 0.062 m. Sedangkan rata-rata kesalahan pengukuran panjang adalah 0.061 m yang tidak jauh berbeda dengan rata-rata perbedaan posisi 3D. Penggunaan titik target natural pada pojok-pojok bangunan candi dapat berkontribusi pada kesalahan ini. Secara alamiah, mengingat bahan yang digunakan dalam

pembangunan candi adalah batu yang dipahat, titik pojok pada bangunan tidaklah berbentuk sempurna, melainkan sedikit membulat. Pada model 3D yang dihasilkan pun menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu bagian tepi dan pojok sedikit melengkung. Hal ini dapat menyebabkan perbedaan interpretasi posisi titik yang sebenarnya. Selain itu, efek *backlighting* membuat identifikasi beberapa titik menjadi sulit dilakukan karena kurang terlihat jelas. Sehingga pada bidikan dan penandaan titik-titik tersebut terdapat potensi kekeliruan.

PENUTUP

Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan diketahui bahwa foto terestrial dan metode *Structure from Motion* dapat digunakan untuk membuat model 3D Candi Singosari. Model 3D yang dihasilkan dapat menunjukkan detail dinding bangunan dengan sangat baik. Dari analisis ketelitian diketahui bahwa rata-rata penyimpangan koordinat 3D adalah $dX=0.029$ m; $dY=0.029$ m; $dZ=0.047$ m yang setara dengan rata-rata pergeseran 3D sejauh 0.062 m. Sedangkan dari segi ketelitian ukuran panjang diketahui bahwa rata-rata kesalahan ukuran panjang adalah 0,062 m. Penggunaan titik target natural dalam penelitian ini ternyata mampu mencapai tingkat ketelitian hingga orde sentimeter. Namun penggunaan hanya foto terestrial pada metode SfM menyebabkan model 3D candi yang terbentuk tidaklah lengkap. Tidak adanya foto dari arah atas menyebabkan bagian atap dan pelataran candi tidak bisa terbentuk.

Saran

Terkait dengan penelitian yang telah dilakukan, ada beberapa saran yang perlu dipertimbangkan untuk riset selanjutnya:

1. Gunakan foto udara miring atau tegak yang diambil dengan wahana UAV untuk dapat memodelkan bagian atap candi.
2. Hindari efek *backlighting* ketika melakukan pemotretan objek. Ada baiknya pemotretan dilakukan pada tengah hari untuk meminimalisasi bayangan dan agar tercapainya pencahayaan yang merata.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM ITS yang telah mendanai penelitian ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Balai Pelestarian Cagar Budaya Mojokerto yang telah memberika izin pelaksanaan survey di lokasi penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- , 2014. *Candi Singasari*. <URL:<http://candi.pnri.go.id/temples/deskripsi-jawa-timur-candi-singasari>>. Accessed on March 15, 2015 11.45 a.m.
- Albertz, J. 2001. *Albrecht Meydenbauer-Pioneer of Photogrammetric Documentation of Cultural Heritage*. Proceedings of 18th International Symposium CIPA 2001, Potsdam, Jerman, 18-21 September 2001.
- Alshawabkeh, Y. 2006. *Integration of Laser Scanning and Photogrammetry for Heritage Documentation*. Dissertation. Stuttgart: Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart.
- BPCB Mojokerto. 2015. *Candi Singosari*. <URL:<http://kebudayaan.kemdikbud.go.id/bpcbtr-owulan/2015/01/23/candi-singosari-2/>>. Accessed on March 15, 2015 12.00 p.m.
- Harintaka, dkk. 2008. *Pemodelan Virtual Bangunan Arkeologi Candi Kelir di Taman Wisata Candi Prambanan Menggunakan Kamera Amatir Digital*. Media Teknik Nomor 4 Tahun XXX Edisi Nopember 2008. ISSN 0216-3012.
- Lo Brutto, M., dkk. 2014. *UAV Platforms for Cultural Heritage: First Results*. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences, Volume II-5, 2014, ISPRS Technical Commission V Symposium, 23-25 Juni 2014, Riva del Garda, Italia.
- Mozas-Calvache, A. T., dkk. 2012. *Method for Photogrammetric Surveying of Archaeological Sites with Light Aerial Platforms*. Journal of Archaeological Science 39 (2012) 521-530.
- Westoby, M. J., dkk. 2012. *Structure from Motion Photogrammetry: A Low Cost, Effective Tool for Geoscience Applications*. Geomorphology 179 (2012) 300-314.
- Wolf, P. R., dan Dewitt, B. A. 2004. *Elements of Photogrammetry: with Application in GIS*. Columbus: McGraw Hill.
- Yastikli, N. 2007. *Documentation of Cultural Heritage Using Digital Photogrammetry and Laser*

Scanning. Journal of Cultural Heritage 8
(2007) 423-427.