



Pembangunan Model Tiga-Dimensi Candi Borobudur dengan Ragam Tingkat Kedetilan (*Multilevel of Detail*) Menggunakan Foto Udara Format Kecil dan Foto Rentang Dekat

Muhammad Mukhlisin¹, Deni Suwardhi¹, Agung Budi Harto¹

¹Kelompok Keilmuan Inderaja dan Sains Informasi Geografis, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Insititut Teknologi Bandung

Abstrak. Candi Borobudur merupakan peninggalan yang berharga bagi dunia. Bahkan pemerintah Indonesia dan UNESCO telah beberapa kali mengambil langkah untuk perbaikan monumen ini dalam proyek besar antara tahun 1975 dan 1982. Untuk turut melestarikan bangunan bersejarah ini metode yang dapat digunakan dengan cara memodelkan kompleks candi Borobudur. Untuk pembuatan model permukaan bumi dari candi Borobudur dapat menggunakan teknik foto udara format kecil menggunakan pesawat tanpa awak sebagai wahana pengambilan gambar. Pesawat tersebut dipasang kamera digital format kecil yang kemudian dikendalikan dengan sistem kendali jarak jauh. Kemudian dari gambar yang telah diperoleh dibentuklah model dengan menggunakan persepsi kedalaman dan prinsip kesegarisan. Sedangkan untuk pemodelan 3D bagian candi lainnya seperti patung, relief dan stupa dapat menggunakan teknik fotogrametri rentang dekat yang menggunakan prinsip yang serupa dengan teknik foto udara. Kemudian dengan menggabungkan kedua hasil diatas didapatkanlah model 3D dengan ragam tingkat kedetilan. Dengan menggunakan model ini sebagai rujukan dalam perawatan candi Borobudur, rekonstruksi dari bentukan candi Borobudur khususnya pada saat diadakan pemugaran ataupun pada saat terjadi bencana alam yang menyebabkan bagian candi rusak dan harus direkonstruksi kembali dapat dilakukan.

Kata kunci: 3D, Borobudur, Tingkat kedetilan.

1 Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Candi Borobudur merupakan peninggalan sejarah yang sangat besar bagi bangsa Indonesia, bahkan menjadi salah satu peninggalan yang cukup berharga bagi dunia. Sebagai salah satu warisan dunia sudah sepantasnya jika Borobudur patut kita jaga keaslian dan kelestariannya. Sebagai upaya untuk menjaga dan melestarikan bangunan bersejarah ini upaya untuk melakukan dokumentasi Borobudur juga telah dilakukan. Pendokumentasian diantaranya dilakukan

dengan cara mengambil gambar dari masing-masing bagian candi. Pada Gambar 1 ditampilkan contoh dokumentasi penampang relief Candi Borobudur yang saat ini tersedia di Balai Konservasi Borobudur.



Gambar 1 Dokumentasi relief Borobudur yang tersedia saat ini.
(sumber: Dokumentasi Balai Konservasi Borobudur)

Namun pendokumentasian saat ini memang belum cukup. Untuk itu diperlukan metode dokumentasi yang dapat mendokumentasikan seluruh detail candi dengan baik. Salah satu metode yang dapat menjadi alternatif dalam pembuatan dokumentasi Borobudur adalah dengan membuat model Tiga-Dimensi Borobudur.

Untuk pembuatan model Tiga-Dimensi (selanjutnya disebut 3D) salah satunya dapat menggunakan teknik fotogrametri. Dalam penelitian ini akan dibahas mengenai pembuatan model 3D Borobudur sehingga model ini dapat digunakan dalam perawatan Borobudur ataupun sebagai wisata virtual.

1.2 Rumusan Masalah

Agar model 3D yang dibentuk dapat digunakan dalam perawatan ataupun sebagai wisata virtual, model yang dihasilkan dengan menggunakan teknik fotogrametri ini harus dapat merepresentasikan bentuk Borobudur. Dalam hal ini tentunya model yang dibentuk harus memiliki tingkat kedetilan yang cukup agar dapat merepresentasikan bentuk Borobudur. Pemasalahannya adalah semakin detil model yang dihasilkan maka semakin banyak pula sumber daya (waktu, kemampuan komputer, penggunaan memori) yang diperlukan, sedangkan untuk dapat merepresentasikan bentuk Borobudur dengan baik dibutuhkan model yang cukup detil. Oleh karena itu dibutuhkan metode yang tepat agar model 3D yang diperoleh dapat merepresentasikan bentuk Borobudur secara optimal. Salah satu cara yang dapat dilakukan adalah dengan membuat model 3D Borobudur dengan ragam tingkat kedetilan.

1.3 Tujuan

1. Membuat model 3D Borobudur dengan dengan ragam tingkat kedetilan dengan menggabungkan teknik fotogrametri rentang dekat dan foto udara format kecil.
2. Mencari metode simplifikasi yang optimal dalam pembentukan model 3D Borobudur dengan ragam tingkat kedetilan.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Dalam penelitian ini akan dibahas mengenai pembuatan model 3D Borobudur dalam berbagai tingkatan detail (*Multilevel of Detail*, selanjutnya akan disebut LOD) yang dapat digunakan dalam perawatan candi Borobudur. Pada penelitian ini sebagian besar pembahasan yang akan dilakukan adalah pembahasan dalam pengolahan data. Adapun pengolahan data yang dilakukan diantaranya adalah pemilihan foto data, pembuatan point cloud, pembuatan model, penyederhanaan model, dan pembuatan LOD. Sedangkan untuk pengambilan data dan visualisasi lanjutan tidak akan dibahas secara terperinci. Adapun data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data foto udara format kecil candi Borobudur yang diambil oleh Dr. Deni Suwardhi, ST.,MT dan tim serta data foto rentang dekat.

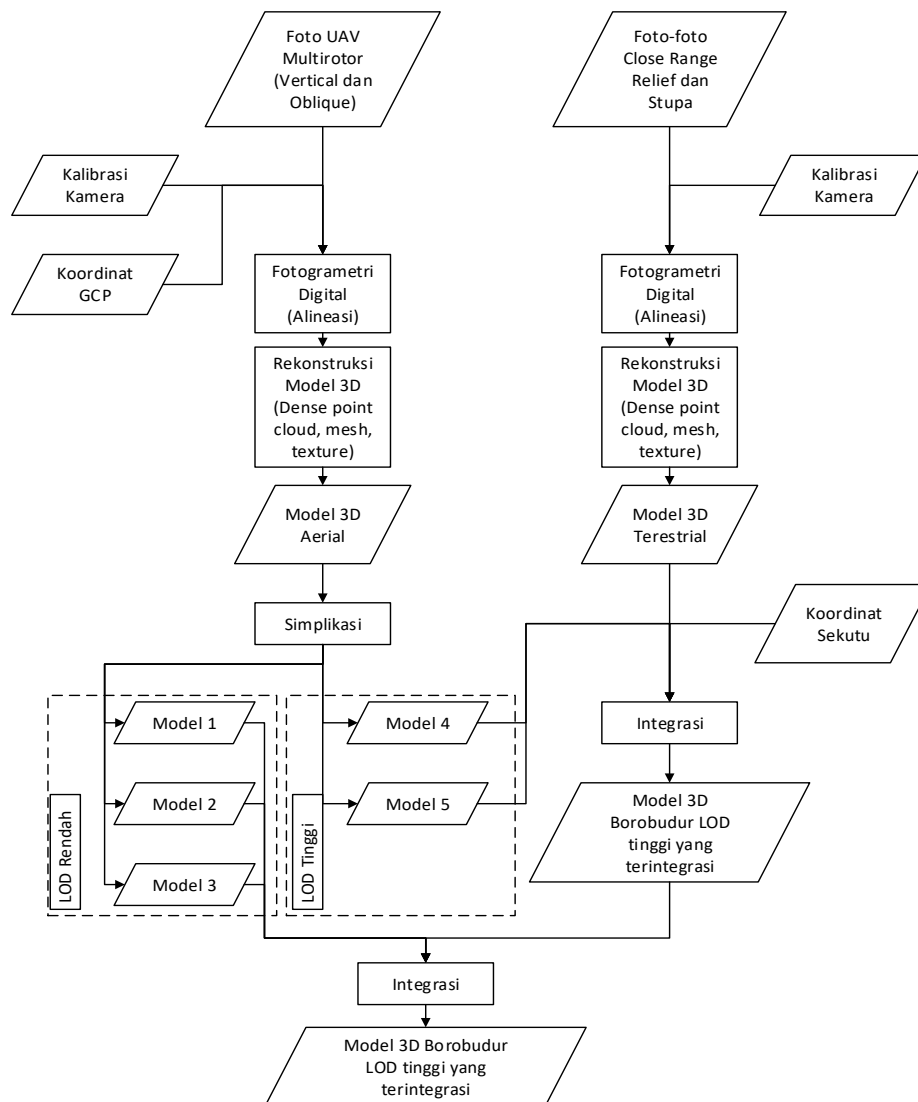
1.5 Metodologi

Dalam pembuatan model 3D Borobudur ada dua data utama yang digunakan. Data pertama yaitu data foto udara format kecil yang diambil dengan menggunakan wahana udara tanpa awak berupa *multicopter* yang dikendalikan dengan *remote control*. Sedangkan yang kedua data foto rentang dekat yang diambil secara langsung dengan menggunakan kamera digital. Kemudian dua data tersebut dibentuk model 3D masing-masingnya dengan menggunakan teknik fotogrametri.

Untuk pembuatan model 3D dengan menggunakan teknik fotogrametri langkah pertama yang dilakukan adalah mencari orientasi kamera dari masing-masing stasiun pengambilan gambar kemudian mencari posisi titik-titik pada gambar dengan menggunakan prinsip kesegarisan sehingga didapatkanlah posisi kumpulan titik-titik yang disebut *point cloud*. Setelah didapatkan *point cloud* kemudian dibentuk mesh yang menyerupai jaring-jaring segitiga yang berbentuk model 3D. Setelah itu jaring-jaring segitiga tersebut diberikan warna seolah-olah menyerupai warna dari objek yang dimodelkan. Proses ini dinamakan dengan pemberian tekstur.

Setelah didapatkan model 3D dari masing-masing data diatas kemudian disederhanakan sehingga menjadi beberapa tingkat kedetilan, dengan

menggunakan koordinat titik sekutu yang diketahui di kedua model (model hasil foto udara dan model hasil foto rentang dekat) kemudian kedua model tersebut diintegrasikan sehingga menjadi model yang utuh. Tetapi sebelum itu perlu dicari metode penyederhanaan yang optimal yang dapat digunakan untuk membuat tingkatan ketelitian pada model 3D Borobudur ini. Untuk lebih jelasnya pada Gambar 2 disajikan diagram alir metodologi penelitian yang digunakan dalam Tugas Akhir ini.



Gambar 2 Metode penelitian.

2 Metode dan Data

2.1 Akuisisi Data

Dalam penelitian kali ini, model 3D Borobudur dibuat dengan menggunakan data foto yang berasal dari pemotretan objek secara langsung tepatnya di candi

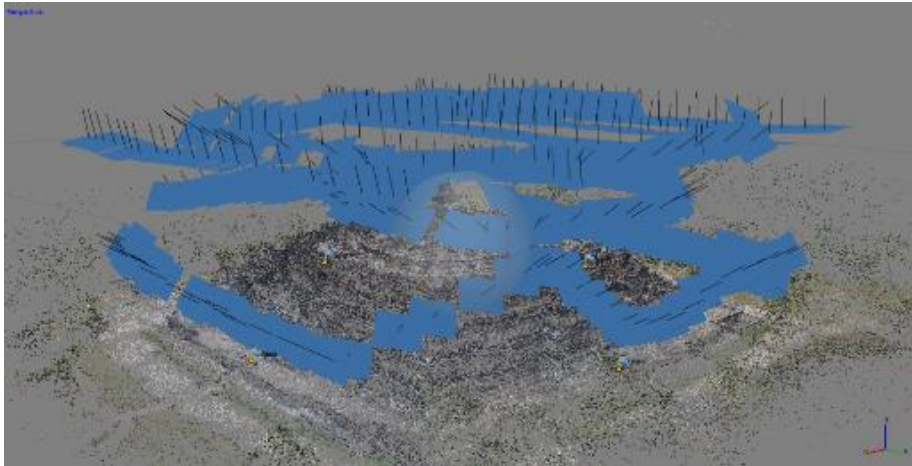
Borobudur, Magelang, Jawa Barat. Data tersebut diambil pada tanggal 7-10 Oktober 2013, 28-31 Oktober 2013 dan 5-8 Januari 2014. Pengambilan data dibagi menjadi dua bagian yaitu pemotretan foto udara format kecil serta pemotretan rentang dekat untuk relief dan stupa.

Pengambilan foto udara Borobudur dilakukan dengan bantuan wahana udara tanpa awak berbentuk *quadcopter*. Jalur terbang dari wahana tersebut dibuat sedemikian rupa sehingga dapat mencakup semua bagian candi Borobudur secara keseluruhan dengan cara membagi jalur terbang menjadi beberapa bagian. Pengambilan data foto rentang dekat dilakukan dengan cara mendatangi objek secara langsung dengan menggunakan kamera *Digital Single-lens Reflex (DSLR)*. Ada dua kamera yang digunakan dalam pengambilan data rentang dekat diantaranya Nikon D5000 dengan lensa 24mm dan Nikon D5100 dengan lensa 18mm.

2.2 Rekonstruksi Fotogrametri dan Pembentukan Model 3D

2.2.1 Rekonstruksi Orientasi Foto

Pada prinsipnya rekonstruksi orientasi foto adalah mencari titik-titik pada foto yang dapat dengan mudah diidentifikasi untuk kemudian dicocokkan dengan titik-titik pada foto lain yang sesuai. Kemudian dicari posisi dan orientasi kamera saat pengambilan data relatif dengan objek yang akan dimodelkan. Posisi dan orientasi kamera kemudian digunakan untuk merekonstruksi titik-titik objek secara 3D. Pada tahap ini juga dihasilkan titik-titik yang digunakan untuk menentukan parameter orientasi kamera yang disebut *sparse point cloud*. Setelah proses ini dilakukan bentuk umum dari objek telah terlihat walaupun masih berbentuk awan titik. Pada Gambar 3 ditampilkan cuplikan gambar setelah proses dilakukan. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa selain posisi kamera telah diketahui (ditandai dengan warna biru) bentuk umum candi Borobudur telah terlihat. Bentuk candi Borobudur ini dibentuk dari kumpulan titik-titik yang disebut awan titik (*point cloud*) (Agisoft LLC, 2013).



Gambar 3 Hasil dari proses alineasi foto.

2.2.2 Pembuatan Dense Point Cloud

Berdasarkan estimasi posisi dan orientasi kamera yang telah didapatkan dalam proses sebelumnya dapat dibuat *dense point cloud* dengan menghitung informasi kedalaman dari setiap foto. Dengan mengetahui bahwa cahaya merambat pada arah lurus, maka dapat disimpulkan bahwa kondisi kedudukan titik pemotretan, titik sasaran manapun dan gambaran ciranya yang seluruhnya terletak di satu garis lurus (Wolf, 1983). Kondisi kebersamaan garis ini disebut juga dengan kondisi kolinearitas atau kondisi kebersamaan garis.

Dengan memproyeksikan berkas sinar dari dua buah foto stereo yang melewati objek yang sama, kemudian berkas cahaya proyeksi sinar yang berasal dari sepasang foto stereo tersebut akan bertemu pada satu titik yang membentuk model 3D. Dalam perangkat lunak Agisoft Photoscan program akan secara otomatis mencari titik-titik yang sama dari pasangan foto stereo dengan cara pencocokan citra (*image matching*). Kemudian dari masing-masing pasangan objek tersebut diproyeksikan menjadi kumpulan titik-titik yang disebut *point cloud* atau 3D *point cloud*.

Pada Gambar 4 dapat ditunjukkan cuplikan gambar setelah proses pembentukan awan titik dilakukan. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa bentuk candi Borobudur dapat terlihat jelas. Jika dibandingkan dengan bentuk candi Borobudur pada Gambar 3, titik-titik pada Gambar 4 memiliki jumlah yang jauh lebih banyak sehingga dapat merepresentasikan bentuk candi Borobudur dengan cukup baik.



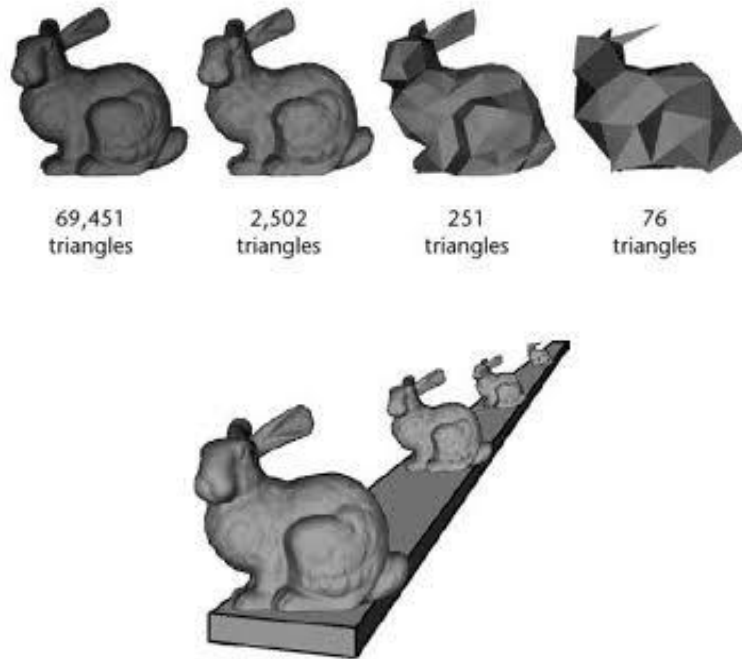
Gambar 4 Hasil setelah proses pembuatan awan titik (*point cloud*).

2.2.3 Pemberian Tekstur

Pemberian tekstur dilakukan agar model 3D yang telah diperoleh terlihat lebih realistis. Pemberian tekstur dapat dilakukan dengan menampalkan foto objek dengan model 3D yang disebut pemetaan tekstur. Proses pemetaan tekstur menggunakan gambar/foto melibatkan transformasi citra terhadap parameter kamera yang digunakan untuk pengambilan data. Jika data yang tersedia mempunyai koordinat 3D maka dapat ditransformasikan sedemikian rupa sehingga sesuai dengan orientasi dari kamera untuk kemudian ditumpangkan dengan gambar dengan memperhatikan visibilitas dari setiap elemen.

2.3 Pembagian Level of Detail

Pembagian LOD meliputi penurunan kedetilan dari model 3D yang bergantung dengan sudut pandang pengamat, dalam pembagian LOD ada beberapa hal yang dapat dipertimbangkan dalam membagi LOD diantaranya adalah jarak dan ukuran. Tingkat kedetilan objek yang ditampilkan bergantung dengan jarak pengamat terhadap objek. Semakin dekat pengamat terhadap objek maka akan semakin detil pula model yang akan ditampilkan (Leubke dkk, 2003). Pada Gambar 5 ditunjukkan sebuah model 3D sederhana yang telah dibagi menjadi beberapa tingkat kedetilan.



Gambar 5 Ilustrasi model dengan ragam tingkat kedetilan
(Sumber: Leubke, Reddy, Cohen, Varshney, Watson, & Hoebner, 2003)

2.4 Penyederhanaan Model

Untuk membuat model dengan beragam tingkat kedetilan perlu sejumlah model dengan berbagai tingkatan detil. Model tersebut dibuat dari penurunan model yang telah dibuat sebelumnya. Model-model ini dibuat dengan cara menyederhanakan model dengan tingkat kedetilan yang lebih tinggi yang dalam hal ini merupakan model Borobudur yang dibuat pada tahapan sebelumnya. Dalam penyederhanaan model digunakan tiga jenis metode penyederhanaan. Metode penyederhanaan yang digunakan diantaranya adalah *quadric edge simplification*, *clustering decimation* dan *uniform mesh resampling*.

2.5 Integrasi Model

Agar keseluruhan objek-objek satuan candi Borobudur (relief, stupa, dll) dapat diintegrasikan dan dijadikan suatu kesatuan model candi Borobudur, perlu dilakukan penyeragaman sistem koordinat. Proses ini dilakukan dengan mengidentifikasi terlebih dahulu titik-titik ikat yang dapat terlihat jelas dari dua objek yang akan disamakan sistem koordinatnya. Pada kasus pertama misalnya kita ingin menyamakan model candi Borobudur yang dihasilkan dari foto udara multirotor dengan stupa yang dihasilkan dari foto retang dekat. Kita ambil model

candi Borobudur sebagai acuan dan model stupa merupakan model yang akan disamakan koordinatnya. Pilih beberapa titik yang dapat diidentifikasi dengan jelas dari kedua model tersebut. Setelah itu, dari model candi Borobudur yang sebelumnya telah diberi koordinat lokal dapat dicari nilai koordinat dari titik-titik yang kita ambil sebagai titik ikat tersebut. Dari nilai koordinat yang telah didapatkan kemudian digunakan untuk mentransformasikan model stupa sehingga mempunyai sistem koordinat yang sama dengan model candi Borobudur. Proses ini dilaksanakan dengan secara otomatis dengan bantuan perangkat lunak *Agisoft Photoscan*.

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Pembuatan Model Tiga-Dimensi Candi Borobudur

Proses pembentukan model Borobudur merupakan serangkaian langkah-langkah dari alineasi foto hingga pembuatan tekstur. Pada alineasi foto dihasilkan parameter orientasi kamera yang kemudian akan dibutuhkan untuk merekonstruksi titik-titik pada foto menjadi titik-titik dalam ruang tiga-dimensi. Pada Gambar 3 ditampilkan cuplikan gambar hasil alineasi foto yang dilakukan dalam perangkat lunak *Agisoft Photoscan*. Pada gambar tersebut terlihat bahwa ada titik-titik tiga dimensi yang membentuk candi Borobudur. Sedangkan yang berwarna biru menyatakan posisi kamera pada saat pengambilan gambar dilakukan.

Setelah dilakukan alineasi foto kemudian model tersebut diberi nilai koordinat. Koordinat yang digunakan merupakan koordinat lokal yang diukur oleh pihak Balai Konservasi Borobudur dengan menggunakan *Electronic Total Station*. Titik yang diberi koordinat terletak di ke-empat arah mata angin. Pada Tabel 1 disajikan daftar koordinat yang digunakan beserta estimasi kesalahan yang dihitung oleh perangkat lunak *Agisoft Photoscan* masing-masing dalam satuan meter dan piksel.

Tabel 1 Daftar koordinat yang digunakan dalam model.

	X (m)	Y (m)	Z (m)	Error (m)	Error (piksel)
Barat	146,758	273,565	269,194	0,048521	0,164
Selatan	200,000	220,995	269,335	0,037684	0,192
Timur	253,533	273,565	269,435	0,047315	0,602
Utara	199,999	327,203	269,437	0,056466	0,386
				0,047962	0,373

Setelah proses alineasi foto dilakukan kemudian dilakukan pembentukan *point cloud* dengan menggunakan orientasi kamera yang telah didapatkan pada proses alineasi. Proses ini menghasilkan kumpulan titik-titik tiga-dimensi yang disebut dengan *point cloud* atau awan titik. Hasil dari proses ini dapat dilihat pada Gambar 4. Pada gambar tersebut terlihat bahwa awan titik yang dihasilkan dalam proses ini memiliki jumlah yang jauh lebih banyak dibandingkan dengan pada proses alineasi foto. Pada gambar tersebut terdapat tepat 94.093.628 buah titik.

Proses selanjutnya adalah pembuatan model tiga dimensi dari candi Borobudur. Pembuatan model dilakukan dengan cara menginterpolasikan titik-titik pada awan titik sehingga membentuk bidang-bidang segitiga yang saling berhubungan. Model yang dibentuk dari bidang-bidang segitiga ini disebut dengan TIN atau *Triangulated Irregular Network*. Model candi Borobudur dibentuk dari ~18.816.810 buah bidang segitiga.

Setelah model terbentuk, proses pembuatan tekstur dapat dilakukan. Pembuatan tekstur dilakukan agar model yang telah dibuat terlihat mendekati keadaan aslinya. Tingkat kemiripan keadaan model yang telah dibuat dengan keadaan aslinya disebut dengan istilah *fidelity*.

3.2 Pembuatan LOD Optimal

Metode simplifikasi yang digunakan menentukan kualitas model-model lain yang diturunkan dari model utama. Untuk mengetahui kualitas dari model yang telah dibuat dalam penelitian ini digunakan uji kualitas verteks yang dihasilkan dengan membandingkan nilai koordinat model yang telah disederhanakan dengan model yang dijadikan acuan. Jika nilai koordinat antara model hasil penyederhanaan dengan model acuan saling mendekati maka nilai kualitas verteks kecil. Dengan kata lain semakin kecil nilai kualitas verteks maka model hasil penyederhanaan semakin mendekati model yang dijadikan acuan.

Pada Tabel 2 diperlihatkan nilai ukuran yang didapatkan dalam penyederhanaan model dengan menggunakan ketiga teknik tersebut. Pada tabel tersebut diperlihatkan bahwa penyimpangan posisi maksimal terdapat pada model hasil penyederhanaan dengan metode *uniform mesh resampling* dengan nilai 3.524288 meter. Sedangkan pada model *quadric edge simplification* dan *clustering decimation* menunjukkan nilai yang hampir serupa sebesar kurang lebih 0.5 meter. Penyimpangan dengan rata-rata terendah berada pada model *quadric edge simplification* dengan nilai kurang lebih 0.025 meter. Sedangkan RMS terendah didapatkan oleh model *quadric edge simplification* dengan nilai kurang dari 0.05 meter. Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa secara numeris model penyederhanaan dengan menggunakan teknik *quadric edge simplification*

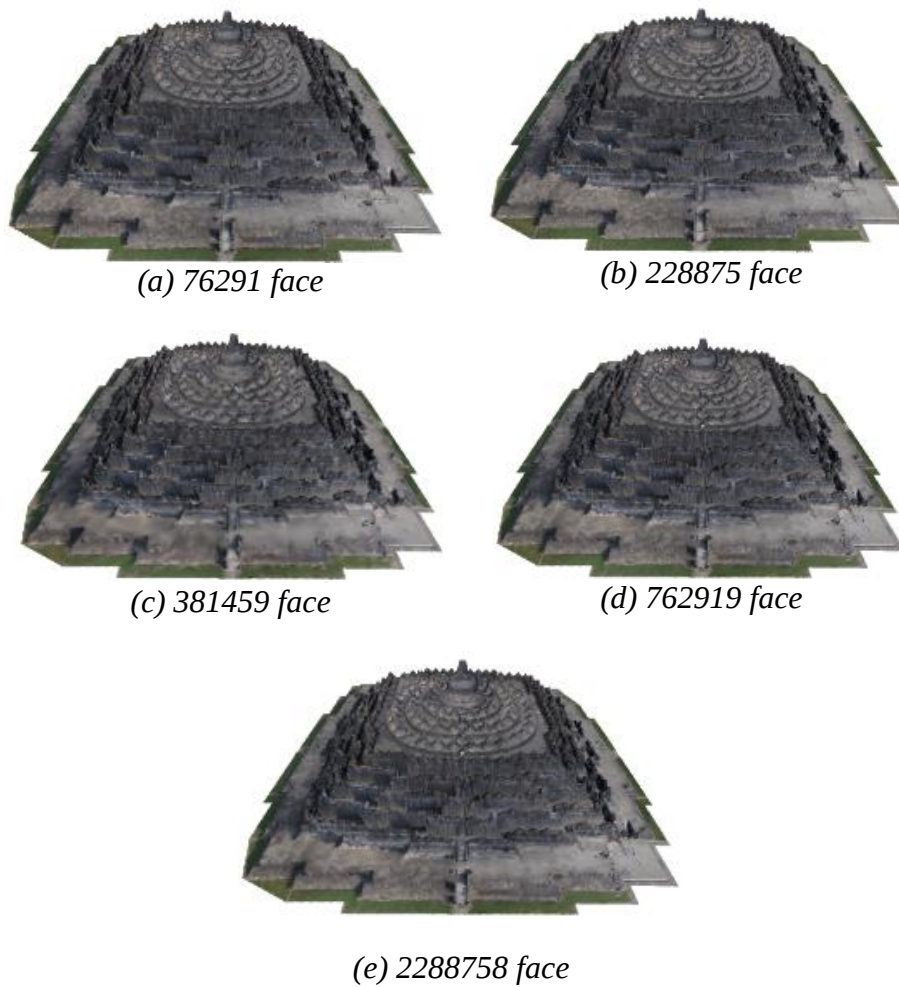
merupakan model yang paling optimal dari kedua model lainnya untuk penyederhanaan model Borobudur.

Tabel 2 Hasil pengukuran kualitas verteks dari model hasil penyederhanaan

	Quadric edge simplification	Clustering decimation	Uniform mesh resampling
Penyimpangan posisi (m)			
Min	0.000000	0.000000	0.000000
Maks	0.571106	0.539380	3.524288
Rata-rata	0.025682	0.046154	0.323433
RMS	0.043750	0.072472	0.788773
Nilai kualitas verteks			
Min	0.000000	0.000000	0.000000
Maks	0.099161	0.539380	3.524288
Jumlah verteks maksimal yang memiliki nilai yang sama (buah)			
	3054	4215	15362

Setelah didapatkan metode penyederhanaan yang optimal untuk pembuatan LOD maka dibuat beberapa model dengan tingkat kedetilan yang berbeda. Model-model yang dibuat diantaranya adalah seperti pada Gambar 6. Gambar 6a merupakan model 3D Borobudur yang mempunyai tingkat kedetilan paling rendah dengan hanya mempunyai 76.291 buah segitiga. Sedangkan pada Gambar 6b, Gambar 6c, Gambar 6d dan Gambar 6e merupakan model 3D Borobudur dengan tingkat kedetilan yang lebih tinggi dengan jumlah segitiga masing-masing 228.875 buah, 381.459 buah, 762.919 buah dan 2288758 buah.

Jika dilihat sekilas keempat model tersebut mempunyai tingkat kedetilan yang sama, tetapi jika diperhatikan dari jarak yang cukup dekat model-model tersebut mempunyai beberapa perbedaan yang cukup terlihat.



Gambar 6 Pembagian model 3D Borobudur dengan ragam tingkat kedetilan.

4 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Pembangunan model tiga-dimensi candi Borobudur dapat dilakukan dengan mengabungkan teknik fotogramerti udara format kecil dan teknik fotogrametri rentang dekat. Penggabungan model dilakukan dengan mencari titik ikat pada kedua set data sehingga dapat dicari hubungan antar data set satu dengan yang lainnya.

2. Teknik penyederhanaan yang optimal untuk pembangunan model tiga-dimensi candi Borobudur untuk tingkat kedetilan yang lebih rendah adalah dengan menggunakan teknik *quadric edge simplification* dibandingkan dengan teknik lain yaitu *clustering decimation* dan *uniform mesh resampling*. Dengan pertimbangan model hasil simplifikasi masih dapat merepresentasikan model induknya yang dibuktikan dengan penghitungan kualitas verteks. Selain itu secara numeris teknik simplifikasi dengan menggunakan *quadric edge simplification* menunjukkan hasil yang cukup bagus dengan rata penyimpangan terhadap model induk sebesar 0.025682 dan rms sebesar 0.043750. Selain itu model yang dihasilkan dengan menggunakan teknik *quadric edge simplification* juga tidak memiliki *nonmanifold edge* ataupun permukaan yang terisolasi.

5 Daftar Pustaka

- [1] Agisoft LLC. (2013). Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.0.0. Agisoft LLC.
- [2] American Society of Photogrammetry. (1980). Manual of Photogrammetry. Virginia Ave: American Society of Photogrammetry.
- [3] Leubke, D., Reddy, M., Cohen, J. D., Varshney, A., Watson, B., & Hoebner, R. (2003). Level Of Detail for 3D Graphics. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.
- [4] Li, R. (1994). Data Structure and Application issue in 3-D Geographic Information System. *Geomatica*, 209-224.
- [5] Li, Z., Zhu, Q., & Gold, C. (2004). Digital Terrain Model Principles and Methodology. New York: CRC Press.
- [6] Prahasta, E. (2008). Model Permukaan Digital. Bandung: Informatika.
- [7] Rahman, A., & Pilouk, M. (2007). Spatial Data Modelling for 3D GIS. New York: Springer.
- [8] Soekmono. (1976). Candi Borobudur A Monument of Mankind. Paris: The Unesco Press.
- [9] Wolf, P. R. (1983). Elements of Photogrammetry with Air Photo Interpretation and Remote Sensing. McGraw-Hill.