

ANALISA KETELITIAN DAN KESESUAIAN PEMODELAN 3D DENGAN PENDEKATAN GEOMETRI DAN TEKNIK *STRUCTURE FROM MOTION* (SFM) PADA OBYEK BANGUNAN

Agung Budi Cahyono, Rifqi Ulinnuha

Jurusan Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan,
Institut Teknologi Sepuluh Nopember,
Jl. Arief Rachman Hakim, Surabaya 60111, Indonesia

Email : agungbudicahyo@gmail.com

Abstract

3D modeling has become an activity that required by other field, such as for research, visualization, inventory, maintenance, and mapping. Buildings are target object of 3D modeling, one of them is Laboratorium Rekayasa Forensik ITS building as public facility. Photogrammetry as an art, a science and technology focused on image processing is one of basic of 3D modeling, especially Close Range Photogrammetry. Modeling of existing objects can be formed from photos with several methods. 3D Modeling methods that have been developed are Geometry-approach and SFM techniques.

Modeling result using Geometry-approach and SFM techniques will be qualified as good if the 3D model has accuracy level 3 (LoD 3). The object research tested are accuracy and suitability of model result to real object. Accuracy is tested by comparing ICP value of observation against ICP value of georeferenced model. The visual aspect is tested by view the similarity of structure and texture result. While modeling suitability tested using some aspect, that is visually, detail geometry, processing duration, specification, cost, format, data, observation, performance, and file size.

From this research generate 3D model of Laboratorium Rekayasa Forensik ITS building that qualified LoD 3, with RMSE value (Easting, Northing, Height) < 50 cm and suitable architecture to real object for both methods, Geometry-approach and SFM technique. Modeling 3D using both methods has each characteristic in detail aspect, duration aspect, specification aspect, cost aspect, data aspect, observation aspect, performance aspect, and file size aspect.

Keywords: SFM, Building, LoD, Geometry, ICP

Abstrak

Pemodelan 3D sudah menjadi suatu kegiatan yang dibutuhkan oleh banyak bidang baik untuk penelitian, visualisasi, inventarisasi, pemeliharaan, dan pemetaan. Bangunan adalah salah satu obyek yang digunakan sebagai target pemodelan 3D. Salah satunya adalah gedung Laboratorium Rekayasa Forensik ITS sebagai fasilitas umum. Fotogrametri sebagai seni, ilmu dan teknologi yang berfokus pada pengolahan foto menjadi salah satu dasar dalam pemodelan 3D *existing*, terutama Fotogrametri Jarak Dekat. Pemodelan obyek *existing* dapat dibentuk dari foto dengan beberapa metode. Metode pemodelan dari foto yang sudah berkembang diantaranya adalah pemodelan dengan Teknik SFM dan pendekatan Geometri.

Hasil pemodelan dengan teknik SFM dan pendekatan Geometri akan dikatakan baik ketika hasil model 3D memiliki tingkat ketelitian tingkat 3 (LoD 3). Dalam hal ini yang diuji adalah ketelitian dan kesesuaian hasil model terhadap obyek sesungguhnya. Ketelitian diuji dengan membandingkan nilai ICP pengukuran dengan hasil transformasi yang sudah ter-georeference. Untuk visual dilihat melalui kesesuaian hasil struktur dan tekstur. Sementara untuk kesesuaian dilihat dari aspek visual, detail geometri, durasi pengolahan, spesifikasi alat, biaya, format, data, pengambilan data, performa, dan ukuran *file*.

Dari Penelitian ini dihasilkan model 3D Laboratorium Rekayasa Forensik yang memenuhi syarat LoD 3, yaitu dengan nilai RMSE (*Easting, Northing, Tinggi*) < 50 cm dan arsitektur yang sesuai dengan obyek sesungguhnya untuk kedua metode, pendekatan Geometri dan teknik SFM. Pemodelan 3D dengan kedua metode tersebut memiliki perbedaan karakteristik dalam aspek detail, durasi pengerjaan, spesifikasi alat, biaya, data foto, pengambilan data, performa, dan ukuran *file*. Untuk penerapan pemodelan 3D, teknik SFM cocok untuk bangunan berstruktur kompleks, sementara pendekatan Geometri cocok untuk bangunan berstruktur sederhana.

Kata Kunci: SFM, Bangunan, LoD, Geometri, ICP

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Pemodelan 3 Dimensi (3D) suatu obyek sudah menjadi salah satu kebutuhan penting dalam banyak bidang seperti pemetaan, pariwisata, dokumentasi, inventarisasi, promosi, animasi, film, dan sebagainya karena memiliki kelebihan tampilan 3D, interaktif dan representatif. Dengan diiringi pesatnya perkembangan ilmu dan teknologi komputer, kebutuhan pemodelan tersebut semakin mudah untuk dilakukan oleh banyak orang yang menekuninya. Bersamaan dengan itu, metode pemodelan pun semakin berkembang dari manual hingga otomatis^{[2],[4],[7]}.

Dalam bidang pemetaan dan rekonstruksi, kebutuhan akan peta interaktif 3D semakin berkembang dan dibutuhkan terutama dalam hal visualisasi dan keruangan. Bangunan *existing* merupakan obyek umum yang dijadikan bahan pemodelan secara 3D^{[2],[3],[4],[7]}.

Fotogrametri sebagai seni, ilmu dan teknologi yang berfokus pada pengolahan foto menjadi salah satu dasar dalam pemodelan 3D, terutama Fotogrametri Jarak Dekat^[5]. Pemodelan obyek *existing* dapat dibentuk dari foto dengan beberapa metode. Metode pemodelan dari foto yang sudah berkembang diantaranya adalah pemodelan dengan pendekatan *Structure From Motion* (SFM)^{[7],[8]}.

SFM adalah salah satu teknik rekonstruksi 3D obyek dari data foto dengan algoritma *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT)^{[7],[8]}. Algoritma SIFT tersebut mengharuskan pengguna untuk memotret objek dengan tingkat *overlap* tinggi^[7].

Ketelitian pemodelan dengan pendekatan Geometri dan Teknik *Structure From Motion* sama – sama dipengaruhi oleh kalibrasi kamera itu sendiri^{[4],[6]}. Akan tetapi keduanya memiliki karakteristik yang sangat berbeda, yaitu dari pengambilan data dan proses pemodelannya. Selain aspek tersebut, masih ada aspek lain diantaranya performa, interoperabilitas, durasi pengerjaan, kualitas visual, dan kualitas ukuran model. Maka dari itu perlu dilakukan adanya perbandingan kedua metode tersebut secara sistematis serta didukung data ukuran obyek sesungguhnya sebagai pembanding yang nantinya didapat hasil perbandingan dan kesesuaiannya

metode terhadap karakteristik obyek. Sehingga hasil tersebut dapat digunakan oleh penulis maupun pembaca sebagai referensi dalam pemilihan metode pemodelan 3D sesuai dengan kebutuhan dan karakteristik obyeknya.

Nilai GCP dan ICP model didapatkan dengan mengukur data lapangan menggunakan Total Station dengan GCP meyebar disudut – sudut bangunan dan ICP menyebar di permukaan bangunan dengan jarak yang bervariasi dari GCP. Nilai ketelitian didapat melalui rumus *RMSE* dan kesesuaian arsitektur dinilai secara visual.

METODOLOGI PENELITIAN

Data Dan Peralatan

- Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Foto gedung Lab. Rekayasa Forensik (aerial dan darat).
2. *Calibration Chart*.
3. Data koordinat GCP dan ICP

- Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Perangkat Lunak (*Software*) :
 - i. Windows 7
 - ii. Program pengolah angka dan teks
 - iii. Program pengolah foto (SFM)
2. Perangkat Keras (*Hardware*) :
 - i. Kamera Sony EXMOR + UAV
 - ii. Total Station
 - iii. Komputer

Metode Penelitian

Lokasi penelitian tugas akhir adalah di gedung Lab. Rekayasa Forensik ITS, Surabaya yang terletak pada 7°16'36" LS dan 112°47'48" BT.

Langkah pertama yang dilakukan adalah melakukan kalibrasi kamera untuk menentukan Parameter Orientasi Dalam Kamera yang kemudian digunakan untuk *undistort* foto obyek^[6]. Foto yang terkoreksi dilakukan *Match-photo* untuk mendapatkan orientasi relatif kamera dengan algoritma pada *SIFT*^{[1],[7]}. Langkah berikutnya adalah melakukan ekstraksi titik berdasar foto hingga membentuk *Point Cloud* yang menggambarkan gedung dalam kumpulan titik. Dari *point cloud* tersebut dilakukan seleksi

titik *outlier* (diluar wilayah obyek dan tidak digunakan) dengan cara menghapus dan/atau membatasi wilayah pada obyeknya saja^[7]. Kumpulan titik – titik tersebut kemudian diperbanyak menjadi *Dense Cloud* hingga bentuk gedung terlihat. Proses selanjutnya adalah *Meshing*, yaitu membuat kerangka gedung dari hasil *dense cloud* tadi menjadi TIN. Untuk mendapatkan model 3D yang menyerupai obyek sesungguhnya, maka dilakukan *Texturing*, yaitu penempelan tekstur pada model 3D sesuai foto obyek^{[4],[7]}. Proses *Meshing* hingga *Teturing* dilakukan dalam tingkat *medium*, karena sudah memenuhi syarat *LoD*.

Untuk pendekatan Geometri proses yang dilakukan sama dengan Teknik SFM, hanya saja tanpa melakukan ekstraksi titik. Sehingga dari orientasi foto langsung dibentuk *Mesh* obyek.

Model 3D akhir yang sudah terbentuk tersebut memiliki sistem koordinat lokal. Agar model 3D tersebut memiliki ukuran mendekati kenyataan dan dapat diuji ketelitiannya maka perlu ditransformasikan terlebih dahulu. Berikan *marker*/titik penanda pada model 3D sejumlah titik GCP dan ICP yang diambil dan tersebar, kemudian berikan definisi koordinat pada GCP saja. Dari proses tersebut, model 3D akan memiliki sistem koordinat sesuai *input* titiknya, UTM. Dari hasil model 3D ter-*georeference* pula dapat dilakukan uji ketelitian dengan mencari nilai *RMSE* koordinat ICP antara hasil pengukuran dan hasil transformasi menggunakan rumus berikut^[4]:

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

Keterangan :

$x_{1,i}$: nilai prediksi ke-i

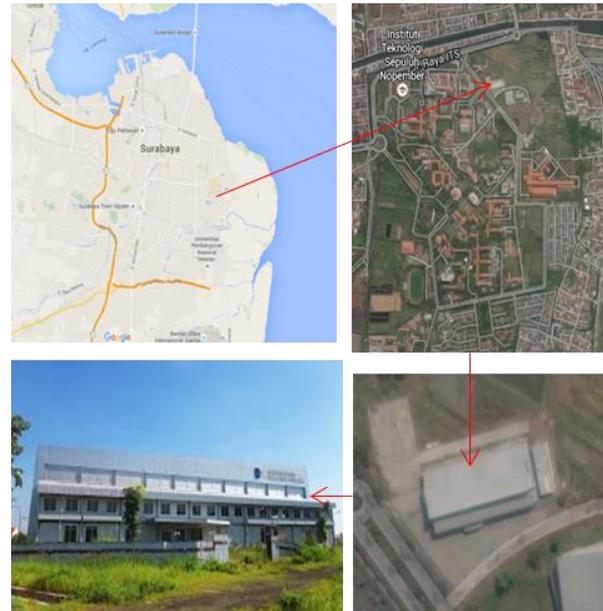
$x_{2,i}$: nilai pengamatan ke-i

n : jumlah pengamatan.

Model 3D akan diuji pada *LoD* 3 dengan syarat sebagai berikut^[3]:

Tabel 1. Syarat Akurasi LoD

Aspek	LoD 3
Skala model	Model eksterior, landmark
Kelas akurasi	Tinggi
Akurasi posisi 3D	0,5 meter
Generalisasi	Fitur nyata > 2x2 m
Struktur	Sesuai obyek sesungguhnya



Gambar 1. Lokasi Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

- Berikut adalah foto obyek Laboratorium Rekayasa Forensik :



Gambar 1. Foto Obyek

- Berikut adalah Parameter Orientasi Dalam Kamera hasil kalibrasi kamera Sony EXMOR:

Tabel 2. Parameter Kalibrasi

Parameter	Nilai
f	3,778 mm
X0	0,3269 pix
Y0	0,1811 pix
K1	5,172 e-004
K2	-5,316 e-006
K3	0,000 e-000
P1	-4,260 e-005
P2	-9,087 e-005

Nilai parameter diatas digunakan untuk mengoreksi foto agar terhindar dari distorsi.

- Berikut adalah hasil koordinat GCP dan ICP :

-GCP (dalam satuan meter)

Tabel 3. GCP Pengukuran

Titik	<i>Easting</i>	<i>Northing</i>	Tinggi
GCP 1	698398,509	9195254,919	33,300
GCP 2	698337,963	9195242,250	33,245
GCP 3	698331,483	9195269,500	34,129
GCP 4	698390,350	9195283,118	34,121
GCP 5	698335,596	9195247,596	47,995
GCP 6	698396,295	9195261,712	49,849

-ICP (dalam satuan meter)

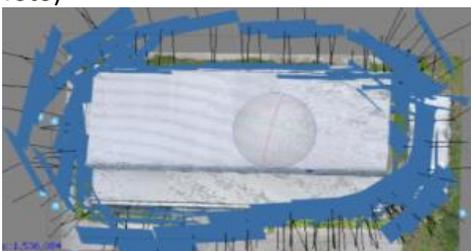
Tabel 4. ICP Pengukuran

Titik	<i>Easting</i>	<i>Northing</i>	Tinggi
ICP 1	698338,532	9195239,918	40,057
ICP 2	698338,647	9195240,398	37,205
ICP 3	698349,924	9195241,581	37,172
ICP 4	698355,207	9195240,36	36,975
ICP 5	698363,674	9195242,398	36,952
ICP 6	698373,732	9195248,552	37,200
ICP 7	698397,223	9195253,500	40,110
ICP 8	698396,877	9195253,939	37,210
ICP 9	698394,205	9195266,116	36,545
ICP 10	698390,945	9195280,143	36,540
ICP 11	698390,904	9195284,792	40,514
ICP 12	698387,030	9195282,175	36,439
ICP 13	698363,639	9195276,748	38,085
ICP 14	698340,252	9195271,317	38,083
ICP 15	698334,980	9195270,098	33,867
ICP 16	698330,380	9195270,711	40,493
ICP 17	698332,387	9195266,376	38,104
ICP 18	698333,400	9195261,167	34,941
ICP 19	698331,975	9195254,382	40,964
ICP 20	698336,376	9195249,222	38,100



Gambar 2. Sebaran GCP dan ICP

4. Model 3D – Teknik SFM dan ICP-nya (160 foto)



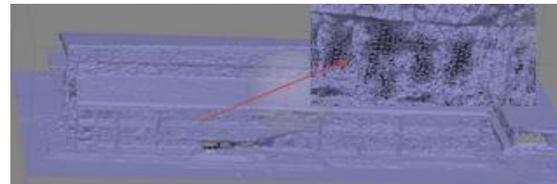
Gambar 3. Orientasi Foto Teknik SFM



Gambar 4. Hasil Point Cloud



Gambar 5. Hasil Dense Cloud



Gambar 6. Hasil Wireframe

Tabel 5. Hasil Geometri

Hasil	Geometri
<i>Point Cloud</i>	63.584 titik
<i>Dense Cloud</i>	13.016.437 titik
<i>Wireframe</i>	1.256.311 vertices & 2.508.750 face



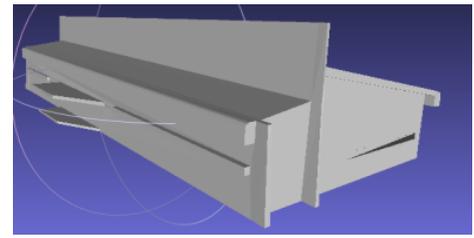
Gambar 6. Hasil Model tertekstur

Tabel 6. ICP Teknik SFM

Titik	<i>Easting (m)</i>	<i>Northing (m)</i>	Tinggi (m)
ICP 1	698338,512	9195239,921	40,019
ICP 2	698338,598	9195240,394	37,213
ICP 3	698350,017	9195241,663	37,226
ICP 4	698355,113	9195240,349	36,925
ICP 5	698363,688	9195242,378	36,903
ICP 6	698373,735	9195248,551	37,292
ICP 7	698397,194	9195253,426	40,000
ICP 8	698396,826	9195253,970	37,244
ICP 9	698394,167	9195266,216	36,590
ICP 10	698390,854	9195280,196	36,616
ICP 11	698390,940	9195284,730	40,563
ICP 12	698387,045	9195282,155	36,523
ICP 13	698363,653	9195276,731	38,159
ICP 14	698340,247	9195271,246	38,149

Lanjutan Tabel 6

Titik	<i>Easting</i> (m)	<i>Northing</i> (m)	Tinggi (m)
ICP 15	698334,969	9195270,083	33,912
ICP 16	698330,433	9195270,643	40,552
ICP 17	698332,363	9195266,387	38,151
ICP 18	698333,388	9195261,160	34,964
ICP 19	698331,969	9195254,410	41,035
ICP 20	698336,355	9195249,237	38,086



Gambar 9. Model *Solid*

Tabel 7. RMSE ICP Teknik SFM (dalam meter)

Titik	Selisih		
	<i>Easting</i>	<i>Northing</i>	Tinggi
ICP 1	0,020	0,003	0,038
ICP 2	0,049	0,004	0,008
ICP 3	0,093	0,082	0,054
ICP 4	0,094	0,011	0,050
ICP 5	0,014	0,020	0,049
ICP 6	0,003	0,001	0,092
ICP 7	0,029	0,074	0,330
ICP 8	0,051	0,031	0,034
ICP 9	0,038	0,100	0,045
ICP 10	0,091	0,053	0,076
ICP 11	0,036	0,062	0,049
ICP 12	0,015	0,020	0,084
ICP 13	0,014	0,017	0,074
ICP 14	0,005	0,071	0,066
ICP 15	0,011	0,015	0,045
ICP 16	0,053	0,068	0,059
ICP 17	0,024	0,011	0,047
ICP 18	0,012	0,007	0,023
ICP 19	0,006	0,028	0,071
ICP 20	0,021	0,015	0,014
RMSE	0,044	0,046	0,092

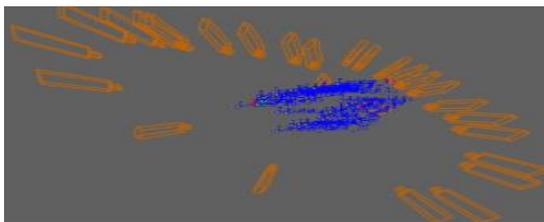
Tabel 8. Geometri model Pendekatan Geometri

Hasil	Geometri
<i>Wireframe</i>	850vertices 290 face

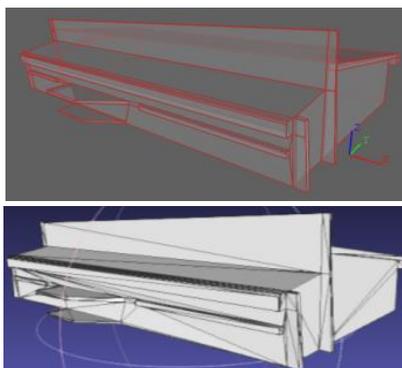
Tabel 9. ICP Pendekatan Geometri

Titik	<i>Easting</i> (m)	<i>Northing</i> (m)	Tinggi (m)
ICP 1	698338,281	9195240,057	39,875
ICP 2	698338,475	9195240,274	37,514
ICP 3	698350,169	9195241,493	37,426
ICP 4	698355,210	9195240,139	36,805
ICP 5	698363,778	9195242,178	36,783
ICP 6	698373,945	9195248,693	37,692
ICP 7	698397,094	9195253,309	39,780
ICP 8	698396,826	9195253,970	37,704
ICP 9	698393,867	9195266,616	36,590
ICP 10	698390,614	9195280,566	36,616
ICP 11	698390,980	9195284,730	40,663
ICP 12	698387,195	9195282,155	36,523
ICP 13	698363,693	9195276,701	38,159
ICP 14	698340,447	9195271,226	38,169
ICP 15	698334,769	9195270,183	33,697
ICP 16	698330,501	9195270,543	40,592
ICP 17	698332,313	9195266,467	38,151
ICP 18	698333,326	9195261,160	34,794
ICP 19	698331,919	9195254,451	41,035
ICP 20	698336,355	9195249,437	38,034

5. Model 3D – Pendekatan Geometri (50 foto)



Gambar 7. Orientasi Foto Teknik Geometri



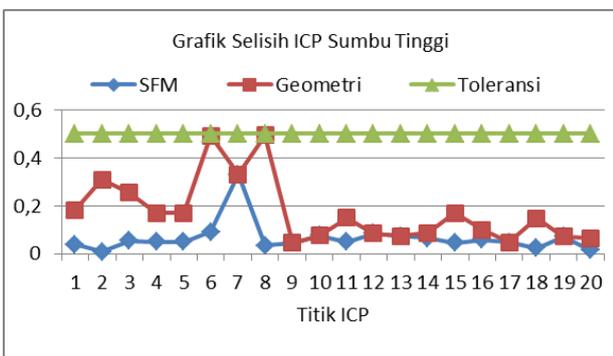
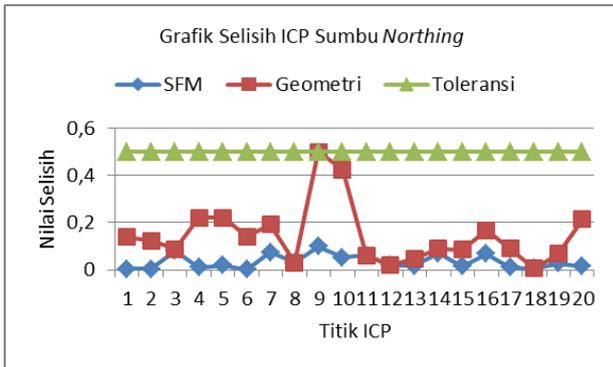
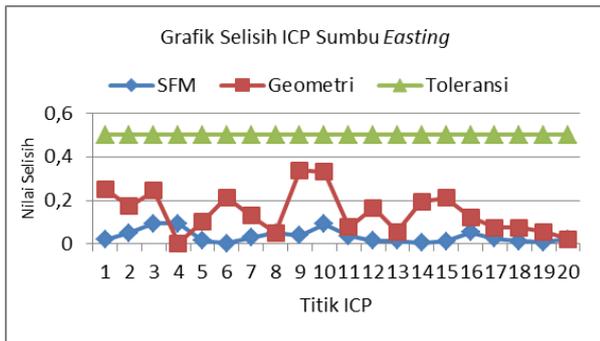
Gambar 8. Model *Wireframe*

Tabel 10. RMSE ICP Pendekatan Geometri (dalam meter)

Titik	Selisih		
	<i>Easting</i>	<i>Northing</i>	Tinggi
ICP 1	0,251	0,139	0,182
ICP 2	0,172	0,124	0,309
ICP 3	0,245	0,088	0,254
ICP 4	0,003	0,221	0,170
ICP 5	0,104	0,220	0,169
ICP 6	0,213	0,141	0,492
ICP 7	0,129	0,191	0,330
ICP 8	0,051	0,031	0,494
ICP 9	0,338	0,500	0,045
ICP 10	0,331	0,423	0,076
ICP 11	0,076	0,062	0,149
ICP 12	0,165	0,020	0,084
ICP 13	0,054	0,047	0,074

Titik	Selisih		
	<i>Easting</i>	<i>Northing</i>	Tinggi
ICP 14	0,195	0,091	0,086
ICP 15	0,211	0,085	0,170
ICP 16	0,121	0,168	0,099
ICP 17	0,074	0,091	0,047
ICP 18	0,074	0,007	0,147
ICP 19	0,056	0,069	0,071
ICP 20	0,021	0,215	0,066
RMSE	0,173	0,192	0,220

6. Grafik ICP



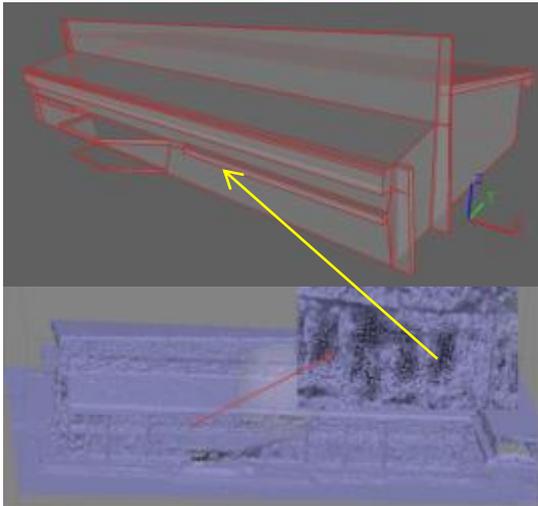
7. Kesesuaian Pemodelan 3D

Tabel 11. Karakteristik Pemodelan 3D

Aspek	SFM	Geometri
(1) Visual & Ketelitian	LoD 3	LoD 3
(2) Detail	Sesuai <i>point cloud</i>	Berdasar <i>face</i> sesuai

Aspek	SFM	Geometri
geometri	dan <i>filtering</i>	bentuk bangunan
(3) Durasi pengolahan	6 jam	24 jam
(4) Spesifikasi alat (<i>Processor, Graphic Card, RAM</i>)	Tinggi	Sedang
(5) Biaya	Mahal	Murah
(6) Format	Banyak (bervariasi)	Banyak (bervariasi)
(7) Data (foto)	Banyak (160 foto)	Sedang (40 foto)
(8) Pengambilan data (foto)	<i>Overlap</i> > 70%	50% < <i>overlap</i> < 70%
(9) Ukuran <i>file</i>	Besar	Kecil
	<ul style="list-style-type: none"> Orientasi relatif berdasar <i>feature detection</i> dan <i>feature matching</i> Dapat dilakukan dalam <i>point, dense cloud</i> maupun <i>mesh</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Orientasi relatif teratur (berdasar <i>locator</i> dan <i>constraint</i> lainnya) Pemodelan dari multi-perspektif Bentuk primitif dapat dipecah (garis dan <i>face</i>)
(10) Performa		

Dari tabel terdapat beberapa perbedaan antara kedua metode tersebut. Dari segi detail, kedua metode menghasilkan model 3D tingkat LoD 3. Namun untuk bentuk detail geometri, Teknik SFM bergantung pada hasil *point cloud* yang dihasilkan dimana jumlah foto dan tingkat *overlap* mempengaruhi proses *image matching*. Sehingga apapun bentuk modelnya jumlah geometri tetap dipengaruhi oleh hasil *point cloud*. Sementara pendekatan Geometri bergantung pada kebutuhan pengguna karena proses pemodelan memprioritaskan bentuk yang akan dimodelkan saja. Sehingga jumlah geometri yang terbentuk akan mengikuti kebutuhan penggunanya pula. Perbedaan geometri terlihat jelas ketika pembuatan bentuk *wireframe* dimana teknik SFM memiliki banyak bentuk poligon, sementara pendekatan Geometri lebih disederhanakan bentuknya. Jadi pemodelan teknik SFM lebih cocok untuk obyek yang memiliki struktur kompleks, sementara pendekatan Geometri lebih cocok untuk obyek yang memiliki struktur sederhana.



Gambar 9. Perbedaan jumlah dan bentuk *wireframe*

Dari segi durasi, teknik SFM lebih cepat karena sedikit melibatkan pengguna dalam prosesnya, yaitu hanya pada proses kalibrasi dan *filtering* saja. Sementara pendekatan Geometri lebih banyak melibatkan pengguna dari proses seleksi foto hingga pembuatan model, sehingga durasi pengerjaan sangat bergantung pada kemampuan pengguna.

Dari spesifikasi alat dan biaya, teknik SFM lebih membutuhkan perangkat keras dengan kualitas dan performa tinggi. Perangkat keras yang berpengaruh adalah *processor*, kartu grafis, RAM, dan daya sehingga semakin besar kebutuhan detail model, semakin tinggi pula spesifikasi alatnya. Sementara untuk pendekatan Geometri membutuhkan tingkat spesifikasi alat sedang untuk kualitas yang sama dengan SFM. Sehingga biaya yang dibutuhkan relatif lebih murah dibanding SFM. Jadi secara spesifikasi alat dan biaya, Pemodelan dengan teknik SFM jauh lebih besar dibandingkan pendekatan Geometri untuk kualitas yang sama, LoD 3.

Dari pengambilan data dan data foto yang digunakan, teknik SFM lebih membutuhkan banyak foto karena model 3D bergantung pada *point cloud* dimana titik-titik tersebut didapat dari foto. Hal tersebut menyebabkan pengambilan data yang mengharuskan *overlap* foto > 70% dan menyamakan jarak antar kamera ke obyek

untuk tiap foto agar model 3D terhindar dari perbedaan skala. Sementara untuk pendekatan Geometri membutuhkan jumlah foto secukupnya yang merepresentasikan bentuk dan wilayah obyek pada tiap foto. Jadi jumlah foto relatif lebih sedikit.

Dari segi ukuran *file*, kedua metode memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Hal ini disebabkan adanya perbedaan jumlah geometri modelnya, baik *vertex*, *face*, *solid*, maupun tekstur. Untuk teknik SFM geometri model memiliki jumlah yang besar karena model disusun awal dari *point cloud*. Sementara untuk pendekatan Geometri jumlah geometri bergantung pada penggambaran yang dilakukan oleh pengguna, sehingga relatif lebih sedikit dibanding teknik SFM.

Tabel 12.Perbandingan ukuran *file*

Metode	Ukuran <i>file</i> (MB)
SFM	405,717
Geometri	0,136

PENUTUP

Kesimpulan dari penelitian ini adalah :

1. Metode Pemodelan 3D dengan pendekatan Geometri dan teknik SFM mampu menghasilkan model 3D gedung Laboratorium Rekayasa Forensik ITS.
2. Visualisasi model 3D menggunakan teknik SFM dengan 160 foto dan pendekatan Geometri dengan 40 foto memenuhi syarat visual LoD3, yaitu representatif struktur dan bentuk obyek.
3. Ketelitian model 3D dengan teknik SFM memenuhi syarat LoD 3 dengan kriteria RMSE < 0,5 m, yaitu RMSE *easting* sebesar 0,044 m, RMSE *northing* sebesar 0,046 m, dan RMSE tinggi sebesar 0,092 m. Sementara dengan pendekatan Geometri memenuhi syarat LoD 3, yaitu RMSE *easting* sebesar 0,173 m, RMSE *northing* sebesar 0,192 m, dan RMSE tinggi sebesar 0,220 m.
4. Pemodelan 3D dengan pendekatan Geometri dan teknik SFM memiliki karakteristik berbeda dari segi detail, durasi

pengerjaan, spesifikasi alat, biaya, data foto, dan pengambilan data foto, performa, dan ukuran *file*.

5. Pemodelan 3D dengan teknik SFM sesuai untuk model bangunan berstruktur kompleks, sementara pendekatan Geometri sesuai untuk bangunan berstruktur sederhana.

Saran yang dapat diberikan dari penelitian ini adalah :

1. Penelitian berikutnya dapat menambahkan perbandingan nilai panjang dan luas segmen sebagai tambahan parameter uji.
2. Penelitian dapat dilanjutkan dengan jenis kamera yang variatif dan obyek yang memiliki variasi bentuk, ukuran, dan tingkat kegunaan.
3. Penelitian berikutnya dapat melanjutkan pemodelan 3D dalam tingkat 4 (LoD 4).
4. Penelitian berikutnya dapat melanjutkan pada analisa algoritmanya.
5. Penelitian berikutnya dapat menggunakan tambahan *Master Plan* bangunan (jika ada) untuk menguji kesesuaian dan ketelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Atkinson, K. B. 1996. *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Scotland: Whittles Publishing
- [2] Debevec, P. E., dkk. 1996. *Modeling and Rendering Architecture from Photographs: A hybrid geometry- and image-based approach*. Computer Graphics, SIGGRAPH 96 Conference Proceedings, August 1996, pp. 11 – 20
- [3] Fan, H dan Meng, L. 2009. *Automatic Derivation of Different Levels of Detail for 3D Buildings Modeled by CityGML*. Munich : Department of Cartography, Technische Universität München
- [4] Hidayat, H. 2012. *Optimalisasi Image-based Architectural Modeling pada Google Sketchup menggunakan Kamera Amatir Digital Terkalibrasi*. Surabaya: ITS Surabaya
- [5] Mikhail, E. M dan Bethel, J. S. 2001. *Introduction to Modern Photogrammetry*. New York: John Wiley & Sons
- [6] Sari, B.K. 2008. *Pengaruh Penggunaan Kalibrasi Kamera Terhadap Hasil Ketelitian Planimetris dan Tinggi Pada Proses Triangulasi Udara (Studi Kasus: Foto Udara Medium Format)*. Surabaya : Teknik Geomatika FTSP ITS
- [7] Snavely, N., Seitz, S. and Szeliski, R., 2008. *Modeling the World from Internet Photo Collections*. International Journal of Computer Vision 80 (2), 189-210.
- [8] Tian, Yixiang. 2011. *Building Recostruction From Terrestrial Video Image Sequences*. Cina : Universitas Twente