

OPTIMASI FORMAT DAN EFISIENSI DATA 3D UNTUK VISUALISASI SUBSURFACE BERBASIS WEB MENGGUNAKAN 3D TILES

Yusuf Almunawar¹, Gusti Ayu Jessy Kartini^{*1}, Ketut Tomy Suhari²

¹Program Studi Teknik Geodesi, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Bandung, Bandung, Indonesia

²School of Geomatics and Geospatial, Faculty of Asia Built Environment and Surveying, Universiti Geomatika Malaysia

Penulis korespondensi: Gusti Ayu Jessy Kartini (ayujessy@itenas.ac.id)

Visualisasi data tiga dimensi (3D) berbasis WebGIS sering menghadapi kendala berupa ukuran data yang besar sehingga memengaruhi efisiensi penyimpanan dan performa visualisasi. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan format data 3D untuk visualisasi subsurface menggunakan 3D Tiles dengan studi kasus Gua Barong. Model 3D direkonstruksi menggunakan Agisoft Metashape, kemudian diproses melalui empat workflow yang membandingkan format LAS, LAZ, dan optimasi geometri menggunakan subsampling. Seluruh model dikonversi ke format 3D Tiles dan divisualisasikan menggunakan CesiumJS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa optimasi berhasil mengurangi jumlah point cloud sebesar 80,72%, sedangkan penggunaan format LAZ mampu mengurangi ukuran file hingga sekitar 67% dibandingkan LAS. Workflow 3 menghasilkan loading time tercepat sebesar 180 ms, penggunaan memori tetap stabil pada kisaran 55,83–57,17 MB, dan seluruh workflow menghasilkan FPS di atas 90, sehingga visualisasi berlangsung secara real-time. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi format LAZ dan 3D Tiles mampu meningkatkan efisiensi visualisasi tanpa mengurangi kualitas representasi model.

Keywords - 3D Tiles, CesiumJS, LAZ, Optimasi Data 3D, WebGIS.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi geospasial telah mendorong transformasi yang signifikan dalam proses akuisisi, pemrosesan, dan penyajian informasi spasial tiga dimensi (3D). Kemajuan teknologi seperti *Light Detection and Ranging* (LiDAR), fotogrametri digital, *laser scanning*, serta metode rekonstruksi berbasis citra memungkinkan pembentukan model 3D dengan tingkat akurasi geometrik dan detail yang semakin tinggi [1], [2], [3]. Selain meningkatkan kualitas representasi objek, perkembangan teknologi tersebut juga mempercepat proses akuisisi data serta memperluas pemanfaatan model tiga dimensi pada

berbagai bidang geospasial. Model 3D saat ini telah diterapkan dalam pemetaan topografi, dokumentasi warisan budaya, pemodelan kota (*digital city*), pembangunan *digital twin*, eksplorasi sumber daya alam, hingga visualisasi lingkungan bawah permukaan (*subsurface*) [4], [5], [6]. Seiring meningkatnya kebutuhan akan informasi spasial yang realistis, interaktif, dan mudah diakses, visualisasi data tiga dimensi berbasis web menjadi salah satu komponen penting dalam mendukung analisis, pengambilan keputusan, serta diseminasi informasi geospasial kepada berbagai pengguna [4], [6].

Dalam penelitian ini, istilah *subsurface visualization* digunakan secara khusus untuk merujuk pada visualisasi geometris ruang atau rongga gua yang berada di bawah permukaan terbuka (*cave passage geometry*). Istilah *subsurface* yang digunakan tidak dimaksudkan untuk merepresentasikan struktur batuan, lapisan tanah, maupun kondisi geofisika bawah permukaan, tetapi mengacu pada representasi geometris interior Gua Barong yang diperoleh melalui rekonstruksi fotogrametri. Dengan demikian, fokus penelitian berada pada efisiensi representasi, pengolahan, transmisi, dan visualisasi model geometris rongga gua berbasis WebGIS menggunakan 3D Tiles.

Meskipun perkembangan teknologi akuisisi dan rekonstruksi telah meningkatkan kualitas model tiga dimensi, peningkatan tersebut juga diikuti oleh bertambahnya ukuran dan kompleksitas data yang dihasilkan. Model hasil akuisisi LiDAR, fotogrametri, maupun *laser scanning* umumnya terdiri atas jutaan hingga miliaran titik (*point cloud*) atau geometri *mesh* yang memerlukan kapasitas penyimpanan besar serta sumber daya komputasi yang tinggi [1], [2], [3]. Besarnya volume data tersebut tidak hanya memengaruhi proses penyimpanan, tetapi juga meningkatkan beban transmisi data melalui jaringan ketika model ditampilkan secara daring. Permasalahan ini menjadi semakin kompleks ketika model tiga dimensi didistribusikan melalui *platform Web Geographic Information System* (WebGIS),

yang memiliki keterbatasan *bandwidth* jaringan, kapasitas memori *browser*, serta kemampuan *rendering* berbasis WebGL [4], [5]. Akibatnya, visualisasi model berukuran besar sering mengalami waktu pemuatan (*loading time*) yang lebih lama, penggunaan memori yang tinggi, penurunan *frame rate*, serta berkurangnya responsivitas sistem terhadap interaksi pengguna [7], [8]. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa diperlukan metode optimasi data yang mampu meningkatkan efisiensi penyimpanan, transmisi, dan visualisasi model tiga dimensi tanpa mengurangi kualitas informasi yang disajikan.

Untuk mengatasi permasalahan visualisasi data tiga dimensi berskala besar, berbagai penelitian telah mengembangkan metode optimasi berbasis 3D Tiles, *Level of Detail* (LOD), dan platform visualisasi CesiumJS. Format 3D Tiles memungkinkan data tiga dimensi dibagi ke dalam struktur spasial yang bersifat hierarkis sehingga proses *streaming* dapat dilakukan secara bertahap sesuai posisi dan sudut pandang pengguna. Pendekatan ini mampu mengurangi beban transmisi data serta meningkatkan efisiensi proses *rendering* pada aplikasi WebGIS [9], [10], [11]. Selain itu, penerapan *Level of Detail* (LOD) memungkinkan sistem menampilkan model dengan tingkat detail yang berbeda sesuai jarak pengamatan, sehingga jumlah geometri yang diproses dapat dikurangi tanpa menurunkan kualitas visual secara signifikan [12], [13]. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa optimasi parameter *rendering* dan pengelolaan data pada platform CesiumJS dapat meningkatkan *loading time*, penggunaan memori, dan *frame rate*, sehingga menghasilkan visualisasi yang lebih responsif untuk model tiga dimensi berskala besar [7], [8].

Meskipun berbagai penelitian telah membuktikan bahwa penerapan 3D Tiles, LOD, dan optimasi *rendering* mampu meningkatkan efisiensi visualisasi data tiga dimensi berbasis web, implementasinya masih didominasi pada objek permukaan seperti *Building Information Modeling* (BIM), model perkotaan (*city model*), maupun infrastruktur [9], [10], [11]. Selain itu, sebagian besar penelitian hanya berfokus pada salah satu aspek optimasi, seperti konversi ke format 3D Tiles, penerapan LOD, atau optimasi parameter *rendering*, tanpa mengintegrasikan seluruh tahapan pengolahan data menjadi suatu *workflow* yang sistematis [7], [12], [13]. Di sisi lain, penelitian mengenai visualisasi *subsurface* berbasis WebGIS masih relatif terbatas, khususnya pada visualisasi geometri rongga gua yang berada di bawah permukaan terbuka. Penelitian yang mengombinasikan proses rekonstruksi model tiga dimensi, optimasi geometri, pembentukan LOD, konversi ke format 3D Tiles, hingga evaluasi performa visualisasi dalam satu alur kerja yang terpadu masih memerlukan pengembangan lebih lanjut. Oleh karena itu, diperlukan suatu *workflow* optimasi yang mampu mendukung visualisasi geometri interior atau rongga gua secara lebih efisien, baik dari aspek ukuran data, kecepatan visualisasi, maupun pemanfaatan sumber daya komputasi.

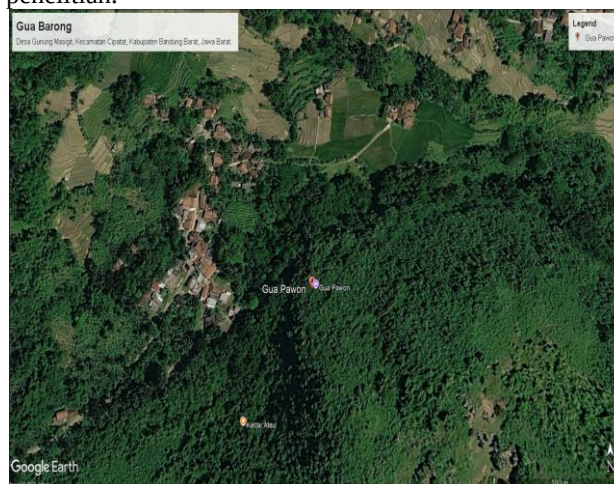
Berdasarkan kesenjangan penelitian tersebut, penelitian ini mengusulkan suatu *workflow* optimasi format data tiga dimensi untuk visualisasi *subsurface*, yang dalam penelitian ini berfokus pada geometri rongga atau interior Gua Barong, berbasis WebGIS menggunakan 3D Tiles. *Workflow* yang dikembangkan mengintegrasikan seluruh tahapan pengolahan data, mulai dari *pre-processing*, optimasi geometri, pembentukan *Level of Detail* (LOD), konversi ke format 3D Tiles, hingga implementasi visualisasi menggunakan CesiumJS. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya berfokus pada satu aspek optimasi, penelitian ini menyajikan alur kerja yang terintegrasi serta mengevaluasi pengaruh setiap tahapan optimasi terhadap ukuran data, waktu pemuatan (*loading time*), penggunaan memori, dan *frame rate* sebagai indikator performa visualisasi [7], [8]. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi berupa *workflow* optimasi yang lebih sistematis untuk mendukung visualisasi objek bawah permukaan secara efisien serta menjadi referensi bagi pengembangan aplikasi WebGIS tiga dimensi pada penelitian selanjutnya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Dataset Penelitian

Penelitian ini menggunakan model tiga dimensi (3D) Gua Barong yang berada di kawasan Karst Citatah, Kabupaten Bandung Barat, Provinsi Jawa Barat sebagai objek penelitian. Model 3D diperoleh melalui rekonstruksi foto hasil akuisisi menggunakan kamera DSLR dengan metode fotogrametri yang diproses menggunakan perangkat lunak Agisoft Metashape. Hasil rekonstruksi berupa data *point cloud* kemudian diekspor ke dalam format LAS sebagai data utama penelitian.

Untuk mengevaluasi pengaruh format data terhadap performa visualisasi berbasis WebGIS, model *point cloud* yang sama juga dikonversi ke dalam format LAZ menggunakan Agisoft Metashape. Dengan demikian, penelitian menggunakan dua format data utama, yaitu LAS dan LAZ, yang berasal dari model 3D Gua Barong yang sama. Selain itu, data *point cloud* permukaan dalam format LAZ digunakan sebagai data pendukung untuk memberikan konteks visualisasi lingkungan sekitar Gua Barong, namun tidak termasuk dalam objek evaluasi penelitian.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Pengolahan data dilakukan menggunakan beberapa perangkat lunak, yaitu Agisoft Metashape untuk rekonstruksi model dan konversi format data, CloudCompare untuk proses *pre-processing* dan optimasi model, Cesium ion untuk konversi ke format 3D Tiles, Visual Studio Code sebagai lingkungan pengembangan aplikasi WebGIS, CesiumJS sebagai pustaka visualisasi tiga dimensi berbasis web, serta Google Chrome sebagai media pengujian performa.

Seluruh proses penelitian dijalankan menggunakan laptop Acer Nitro 5. Rincian data, perangkat lunak, dan perangkat keras yang digunakan disajikan pada Tabel I, Tabel II, dan Tabel III.

Tabel 1. Data Penelitian

No	Data	Format	Fungsi
1	Foto hasil akuisisi Gua Barong	JPG	Data masukan untuk rekonstruksi model 3D
2	Model <i>point cloud</i> Gua Barong	LAS	Data utama penelitian
3	Model <i>point cloud</i> Gua Barong	LAZ	Hasil konversi dari model LAS untuk pengujian <i>workflow</i>
4	Model <i>point cloud</i> permukaan	LAZ	Data pendukung visualisasi permukaan

Tabel 2. Perangkat Lunak

No	Data	Fungsi
1	Agisoft	Rekonstruksi model 3D dan konversi format LAS/LAZ
2	CloudCompare	Optimasi <i>point cloud</i> menggunakan metode subsampling
3	Cesium ion	Konversi model ke format 3D Tiles
4	Visual Studio Code	Pengembangan aplikasi WebGIS
5	CesiumJS	Visualisasi model 3D berbasis

No	Data	Fungsi
6	Google Chrome	WebGIS
		Pengujian performa visualisasi

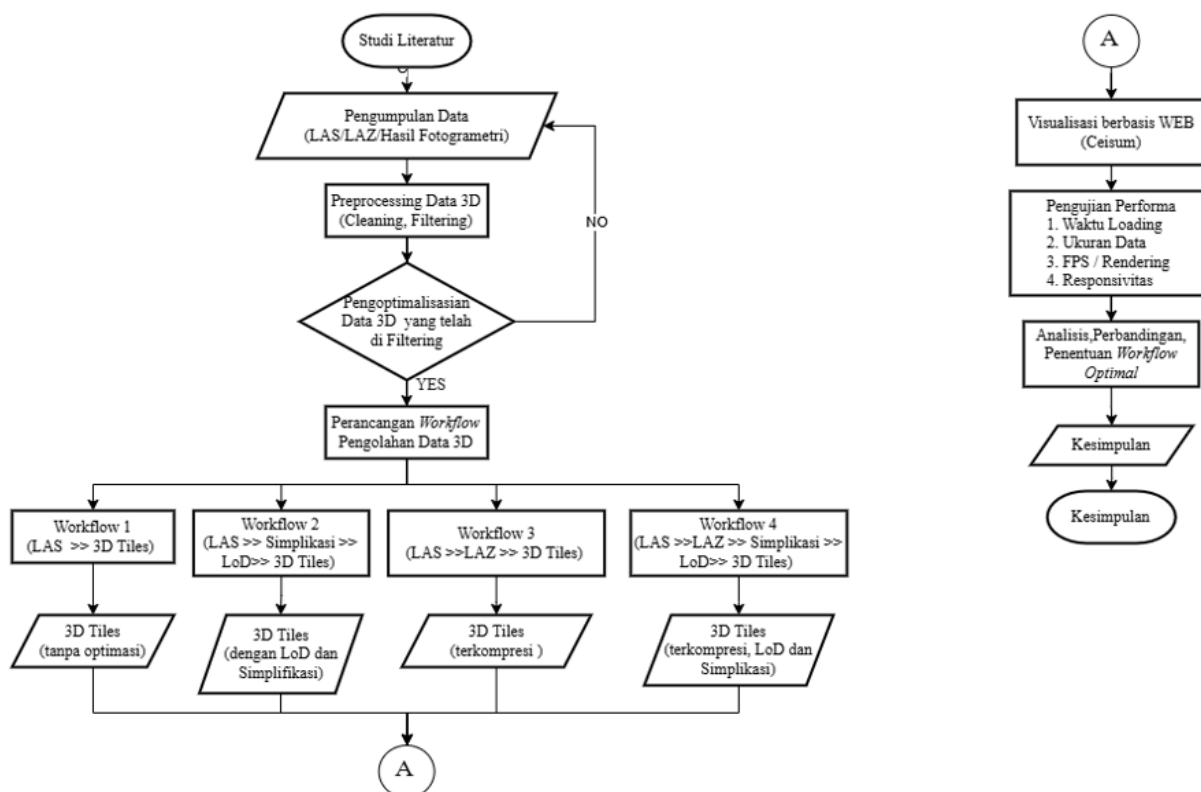
Tabel 3. Perangkat Keras

No	Komponen	Spesifikasi
1	Perangkat	Acer Nitro 5
2	Processor	11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-11400H @ 2.70GHz (2.69 GHz)
3	RAM	16,0 GB
4	GPU	GeForce RTX 3050 Ti
5	Penyimpanan	512,0 Gb

B. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur mengenai visualisasi data tiga dimensi berbasis WebGIS, teknologi 3D Tiles, serta teknik optimasi data *point cloud*. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data berupa foto hasil akuisisi menggunakan kamera DSLR yang direkonstruksi menjadi model tiga dimensi menggunakan Agisoft Metashape. Model yang dihasilkan kemudian diexport ke dalam format LAS sebagai data utama penelitian dan format LAZ sebagai data hasil kompresi. Sebelum dilakukan proses visualisasi, data *point cloud* menjalani tahap *pre-processing* yang meliputi proses *cleaning* dan *filtering* untuk menghilangkan *noise* serta memperbaiki kualitas data. Apabila hasil *pre-processing* belum memenuhi kebutuhan penelitian, proses pengolahan diulangi hingga diperoleh model yang layak untuk tahap berikutnya.

Setelah proses *pre-processing*, penelitian menerapkan empat *workflow* pengolahan data untuk mengevaluasi pengaruh format data dan teknik optimasi terhadap performa visualisasi berbasis WebGIS. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Empat *workflow* yang diterapkan memiliki karakteristik sebagai berikut :

1. *Workflow* 1 menggunakan data *point cloud* dalam format LAS yang langsung dikonversi menjadi format 3D Tiles tanpa proses optimasi sebagai kondisi dasar (*baseline*).
2. *Workflow* 2 menggunakan data LAS yang terlebih dahulu melalui proses simplifikasi model dan pembentukan *Level of Detail* (LoD), kemudian dikonversi menjadi format 3D Tiles.
3. *Workflow* 3 menggunakan data yang telah dikonversi ke format LAZ sebagai hasil kompresi dari model yang sama, kemudian langsung dikonversi menjadi format 3D Tiles tanpa proses optimasi tambahan.
4. *Workflow* 4 menggunakan data format LAZ yang selanjutnya melalui proses simplifikasi model dan pembentukan *Level of Detail* (LoD) sebelum dikonversi menjadi format 3D Tiles.

Keempat *workflow* tersebut selanjutnya diimplementasikan pada aplikasi WebGIS berbasis CesiumJS untuk dilakukan evaluasi performa. Parameter evaluasi yang digunakan meliputi ukuran data (*file size*), waktu pemuatan (*loading time*), penggunaan memori (*memory usage*), *frame rate* (FPS), serta responsivitas sistem. Hasil evaluasi dari masing-masing *workflow* kemudian dibandingkan untuk menentukan konfigurasi pengolahan data yang memberikan performa visualisasi paling optimal.

C. Optimasi dan Visualisasi 3D

Model *point cloud* Gua Barong yang telah melalui tahap *pre-processing* selanjutnya diproses sesuai dengan skenario pada masing-masing *workflow*. Tahap optimasi dilakukan untuk meningkatkan efisiensi visualisasi tanpa mengurangi representasi bentuk objek secara signifikan. Proses optimasi meliputi penyederhanaan (*simplification*) jumlah titik atau geometri model serta pembentukan *Level of Detail* (LoD) sehingga model dapat ditampilkan dengan tingkat kedetailan yang menyesuaikan jarak pandang pengguna.

Pada *workflow* yang menggunakan format LAZ, proses diawali dengan konversi model dari format LAS menjadi LAZ menggunakan Agisoft Metashape. Format LAZ dipilih karena merupakan format *point cloud* terkompresi yang memiliki ukuran penyimpanan lebih kecil dibandingkan format LAS, sehingga diharapkan mampu meningkatkan efisiensi penyimpanan dan proses transmisi data pada aplikasi berbasis web.

Seluruh model hasil optimasi kemudian dikonversi ke dalam format 3D Tiles menggunakan Cesium ion. Format 3D Tiles dipilih karena mendukung mekanisme streaming, pembagian data ke dalam tile, serta pemanfaatan *Level of Detail* secara dinamis sehingga proses visualisasi menjadi lebih efisien pada lingkungan WebGIS. Hasil konversi kemudian diintegrasikan ke dalam aplikasi WebGIS yang dikembangkan menggunakan CesiumJS sebagai media visualisasi tiga dimensi berbasis web. Pendekatan ini sejalan dengan [6], [10] yang menunjukkan pemanfaatan 3D Tiles dan CesiumJS untuk penyajian serta visualisasi data 3D berbasis web.

Visualisasi dilakukan menggunakan peramban Google Chrome dengan menampilkan model bawah permukaan Gua Barong sebagai objek utama penelitian. Selain itu, model permukaan dalam format LAZ ditambahkan sebagai data pendukung untuk memberikan konteks spasial terhadap posisi objek bawah permukaan tanpa menjadi bagian dari proses evaluasi performa.

D. Evaluasi Performa

Evaluasi performa dilakukan untuk menganalisis pengaruh empat *workflow* pengolahan data terhadap efisiensi visualisasi model tiga dimensi Gua Barong pada aplikasi WebGIS berbasis CesiumJS. Seluruh pengujian dilakukan menggunakan perangkat keras dan perangkat lunak yang sama sehingga setiap *workflow* dievaluasi pada kondisi yang konsisten. Parameter evaluasi yang digunakan meliputi ukuran data (*file size*), waktu pemuatan (*loading time*), penggunaan memori (*memory usage*), *frame rate* (*Frames Per Second* atau FPS), serta responsivitas sistem.

Evaluasi ukuran data dilakukan untuk mengetahui efektivitas proses kompresi dan optimasi pada masing-masing *workflow*. Besarnya reduksi ukuran data dihitung dengan membandingkan ukuran data sebelum dan sesudah proses pengolahan menggunakan Persamaan (1).

$$R_s = \left(1 - \frac{sf}{sr}\right) \times 100\% \quad (1)$$

Semakin besar nilai reduksi ukuran data, semakin tinggi efisiensi penyimpanan yang dihasilkan oleh proses optimasi.

Selanjutnya, *loading time* digunakan untuk mengukur lama waktu yang dibutuhkan sejak proses pemuatan model dimulai hingga seluruh model berhasil ditampilkan pada aplikasi WebGIS. Pengukuran dilakukan menggunakan fitur *Developer Tools* pada Google Chrome dan dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$LT = t_{end} - t_{start} \quad (2)$$

Semakin kecil nilai *loading time*, semakin baik performa visualisasi yang dihasilkan.

Kelancaran proses visualisasi dievaluasi menggunakan parameter *frame rate* (FPS), yaitu jumlah *frame* yang mampu dirender setiap detik selama proses interaksi dengan model tiga dimensi. Nilai FPS diperoleh dari rata-rata hasil pengamatan selama proses pengujian sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3).

$$FPS = \frac{\sum FPS}{n} \quad (3)$$

Nilai FPS yang lebih tinggi menunjukkan proses *rendering* yang lebih stabil dan pengalaman visualisasi yang lebih baik.

Selain ketiga parameter tersebut, evaluasi juga dilakukan terhadap penggunaan memori (*memory usage*) selama proses visualisasi. Penggunaan memori diamati menggunakan fitur *Developer Tools* pada Google Chrome dan dicatat dalam satuan *megabyte* (MB). Parameter ini digunakan untuk mengetahui kebutuhan sumber daya sistem pada masing-masing *workflow*. Semakin kecil penggunaan memori, semakin efisien proses visualisasi yang dihasilkan.

Responsivitas sistem dievaluasi secara deskriptif berdasarkan kemampuan aplikasi dalam merespons interaksi pengguna selama proses visualisasi, seperti

zoom, *pan*, dan *rotate*. Sistem yang mampu menampilkan perubahan tampilan secara cepat tanpa jeda (*lag*) dinilai memiliki tingkat responsivitas yang baik. Seluruh hasil evaluasi dari keempat *workflow* kemudian dibandingkan untuk menentukan konfigurasi pengolahan data yang memberikan performa visualisasi paling optimal berdasarkan ukuran data, waktu pemuatan, penggunaan memori, kelancaran *rendering*, dan responsivitas sistem.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Model tiga dimensi Gua Barong dibangun melalui proses rekonstruksi fotogrametri menggunakan perangkat lunak Agisoft Metashape berdasarkan data citra hasil akuisisi lapangan. Proses rekonstruksi menghasilkan model tiga dimensi yang kemudian diekspor ke dalam

Tabel 4. Karakteristik *Point cloud* dan Ukuran *File* per *Workflow*

<i>Workflow</i>	Format	Optimasi	Jumlah <i>Point cloud</i>	Ukuran <i>File</i> (MB)
1	LAS	Tidak	19.322.093	534.38
2	LAS	Optimasi	3.725.925	103.05
3	LAZ	Tidak	19.322.093	175.11
4	LAZ	Optimasi	3.725.925	34.40

Berdasarkan Tabel 1, penggunaan format LAZ memberikan pengurangan ukuran *file* yang signifikan dibandingkan format LAS, meskipun jumlah *point cloud* yang direpresentasikan tetap sama. Pada *workflow* tanpa optimasi, ukuran *file* berkurang dari 534,38 MB menjadi 175,11 MB, atau sekitar 67,2% lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa kompresi yang diterapkan pada format LAZ mampu meningkatkan efisiensi penyimpanan tanpa mengubah jumlah titik hasil akuisisi. Temuan ini mendukung pentingnya efisiensi penyimpanan dan distribusi *point cloud* dalam lingkungan 3D WebGIS, sebagaimana dibahas oleh [16].

Selain pengaruh format penyimpanan, proses optimasi menggunakan metode *subsampling* dengan parameter 0,002 juga menghasilkan pengurangan jumlah *point cloud* yang cukup besar. Jumlah titik berkurang dari 19.322.093 menjadi 3.725.925 titik, atau sekitar 80,72%. Pengurangan tersebut diikuti oleh penurunan ukuran *file* menjadi 103,05 MB pada format LAS dan 34,40 MB pada format LAZ. Hasil ini sejalan dengan [17] yang

format *point cloud* sebagai data utama penelitian. Selanjutnya, data tersebut diproses melalui empat *workflow* untuk membandingkan pengaruh format data (LAS dan LAZ) serta penerapan optimasi geometri terhadap efisiensi visualisasi berbasis WebGIS.

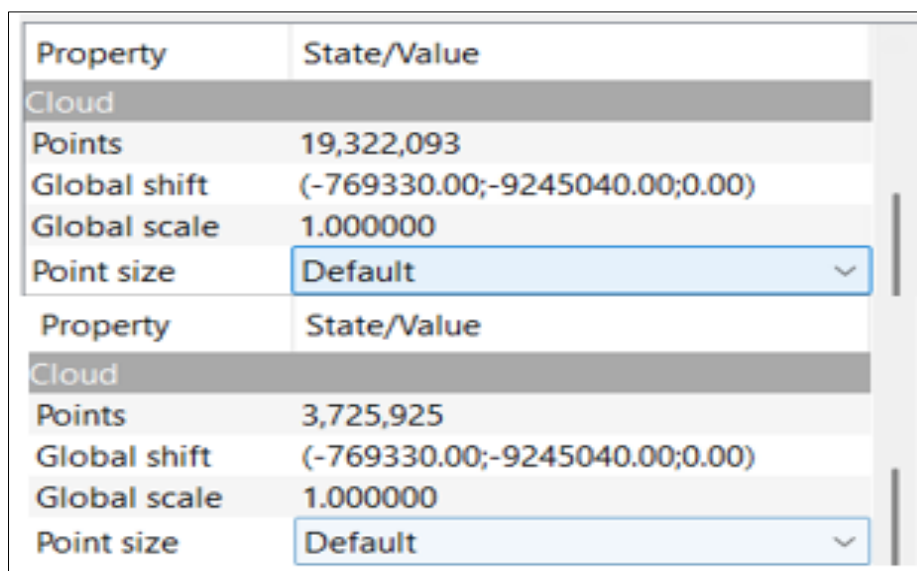
Karakteristik awal hasil rekonstruksi ditunjukkan oleh model *mesh* yang terdiri atas 661.105 *faces* dan 330.766 *vertices*. Model tersebut menggunakan tekstur berukuran 4096×4096 *piksel* dengan format 4 *bands* (uint8) sehingga mampu merepresentasikan bentuk dan tekstur permukaan gua secara detail. Meskipun demikian, proses optimasi pada penelitian ini tidak dilakukan terhadap *mesh*, melainkan pada data *point cloud* yang diekspor dari hasil rekonstruksi. Karakteristik *point cloud* pada masing-masing *workflow* disajikan pada Tabel 4.

menunjukkan bahwa penyederhanaan *point cloud* dapat mengurangi jumlah data dengan tetap mempertahankan fitur geometris penting.

Secara keseluruhan, *Workflow* 4 menghasilkan ukuran *file* paling kecil, sedangkan *Workflow* 1 memiliki ukuran *file* terbesar. Perbedaan karakteristik ini menjadi dasar untuk mengevaluasi pengaruh format data dan optimasi geometri terhadap efisiensi visualisasi pada WebGIS yang dibahas pada subbab berikutnya.

Optimasi geometri dilakukan menggunakan metode *subsampling* pada perangkat lunak CloudCompare dengan parameter 0,002. Proses ini bertujuan untuk mengurangi jumlah *point cloud* tanpa menghilangkan bentuk geometris utama dari model tiga dimensi. Hasil optimasi kemudian dibandingkan dengan data sebelum optimasi untuk mengetahui pengaruhnya terhadap efisiensi penyimpanan.

Perbandingan jumlah *point cloud* sebelum dan sesudah optimasi ditunjukkan pada Gambar 3.

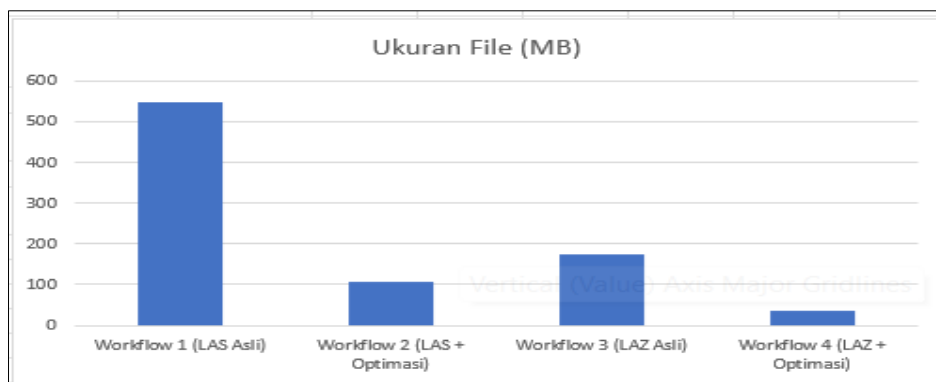


Gambar 3. Perbandingan Jumlah *Point cloud* Sebelum dan Sesudah Optimasi

Berdasarkan hasil optimasi, jumlah *point cloud* mengalami penurunan dari 19.322.093 titik menjadi 3.725.925 titik. Hal ini menunjukkan bahwa proses *subsampling* berhasil mengurangi jumlah titik sebesar 15.596.168 titik, atau sekitar 80,72% dibandingkan data awal. Pengurangan tersebut bertujuan untuk mengurangi

kompleksitas model sehingga lebih efisien dalam proses penyimpanan maupun visualisasi berbasis web.

Selain mengurangi jumlah titik, optimasi juga berdampak terhadap ukuran *file*. Perbandingan sebelum dan sesudah optimasi ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Perbandingan Ukuran File Sebelum dan Sesudah Optimasi Perbandingan

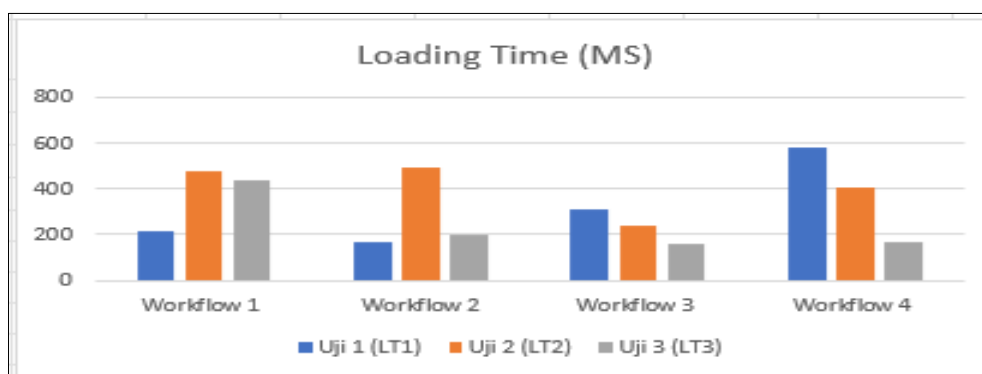
Pada format LAS, ukuran file berkurang dari 534,38 MB menjadi 103,05 MB, sehingga terjadi pengurangan sebesar 431,33 MB atau sekitar 80,72%. Sementara itu, pada format LAZ, ukuran file berkurang dari 175,11 MB menjadi 34,40 MB, atau berkurang sebesar 140,71 MB dengan persentase sekitar 80,36%.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode *subsampling* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi penyimpanan data, baik pada format LAS maupun LAZ. Penurunan jumlah *point cloud* secara langsung diikuti oleh penurunan ukuran *file*, sehingga kebutuhan ruang penyimpanan menjadi lebih kecil tanpa mengubah struktur utama model tiga dimensi. Temuan ini konsisten dengan [17] mengenai manfaat simplifikasi *point cloud* untuk mengurangi kompleksitas data.

Meskipun jumlah titik berkurang lebih dari 80%, hasil visualisasi menunjukkan bahwa bentuk umum (*overall geometry*) model Gua Barong masih dapat dipertahankan. Detail-detail utama pada dinding gua, lorong, dan permukaan batuan masih terlihat dengan baik sehingga model tetap representatif untuk kebutuhan visualisasi berbasis WebGIS. Hal ini menunjukkan bahwa parameter *subsampling* yang digunakan masih mampu menjaga keseimbangan antara efisiensi data dan kualitas representasi model.

Secara keseluruhan, optimasi geometri melalui metode *subsampling* terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi model tiga dimensi. Pengurangan jumlah *point cloud* lebih dari 80% menghasilkan ukuran *file* yang jauh lebih kecil, *subsurface* tetap mempertahankan karakteristik geometris utama model. Hasil ini menjadi dasar untuk tahap berikutnya, yaitu evaluasi pengaruh konversi ke format 3D Tiles terhadap performa visualisasi WebGIS.

Evaluasi performa dilakukan untuk mengetahui pengaruh optimasi data terhadap efisiensi visualisasi model tiga dimensi pada WebGIS berbasis CesiumJS. Pengujian dilakukan pada empat *workflow* dengan tiga kali pengulangan untuk setiap *workflow* menggunakan prosedur yang sama. Parameter yang dievaluasi meliputi *loading time*, *memory usage*, dan *frame rate* (FPS). Nilai rata-rata dari setiap parameter digunakan sebagai dasar perbandingan performa antar-*workflow*. Hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengidentifikasi pengaruh format data dan optimasi geometri terhadap efisiensi visualisasi pada WebGIS. Selain itu, perbandingan antar-*workflow* dilakukan untuk menentukan konfigurasi pengolahan data yang memberikan performa visualisasi paling optimal.



Gambar 5. Perbandingan Loading time pada Setiap Workflow

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 5, setiap *workflow* menunjukkan waktu pemuatan (*loading time*) yang berbeda. *Workflow* 1 memiliki rata-rata waktu pemuatan 375,67 ms, *Workflow* 2 sebesar 287,67 ms,

Workflow 3 sebesar 237,00 ms, sementara *Workflow* 4 memiliki rata-rata 385,00 ms.

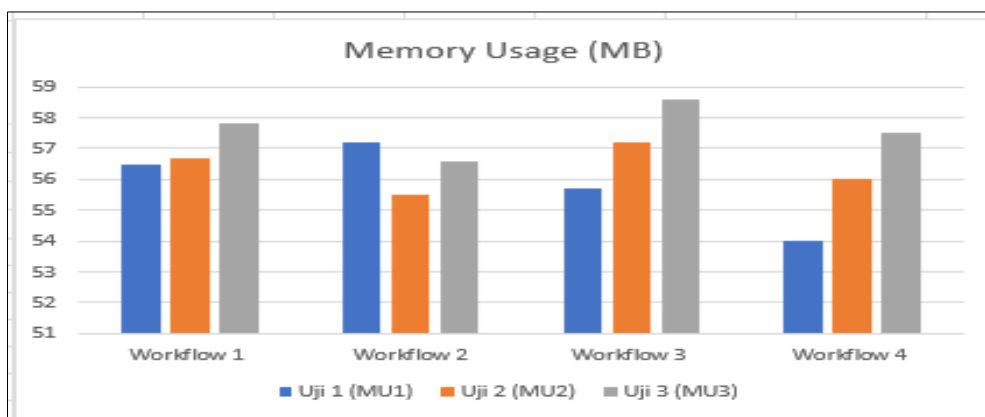
Hasil tersebut menunjukkan bahwa *Workflow* 3 memiliki waktu pemuatan tercepat dibandingkan

workflow lainnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa penggunaan format LAZ tanpa *subsampling* memberikan waktu pemuatan paling rendah pada pengujian yang dilakukan. Namun, hasil ini tidak berarti bahwa ukuran *file* semata-mata menentukan *loading time*, karena proses penyajian 3D Tiles juga dipengaruhi oleh mekanisme pemuatan dan pengelolaan tile pada sisi browser. Temuan ini sejalan dengan [7] yang menunjukkan bahwa performa visualisasi pada CesiumJS dipengaruhi oleh strategi pemuatan data 3D Tiles selain ukuran data.

Di sisi lain, Workflow 4 memiliki ukuran file paling kecil, namun waktu pemuatannya tidak menjadi yang tercepat. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa ukuran berkas bukan merupakan satu-satunya faktor yang menentukan waktu pemuatan data 3D Tiles. Workflow 4 menghasilkan ukuran data paling kecil karena menerapkan kombinasi *subsampling* dan kemudian dikonversi ke 3D Tiles. Meskipun demikian, proses visualisasi pada browser tidak hanya melibatkan transmisi data, tetapi juga mencakup pembacaan struktur tileset, evaluasi hierarki tile, proses decoding, dan pemuatan

geometri sebelum dapat dirender. Tahapan tersebut dapat menimbulkan overhead pada pengelolaan struktur hierarki 3D Tiles. Kondisi tersebut dapat menjelaskan mengapa Workflow 4 yang menghasilkan ukuran berkas sebesar 34,40 MB memiliki *loading time* rata-rata 385,00 ms, lebih tinggi dibandingkan Workflow 3 yang menghasilkan ukuran berkas sebesar 175,11 MB dengan *loading time* rata-rata 237,00 ms. Temuan ini konsisten dengan hasil [7] bahwa performa visualisasi 3D Tiles tidak hanya ditentukan oleh ukuran data, tetapi juga oleh strategi pembagian dan pemuatan tile. Selain itu, waktu pemuatan dapat dipengaruhi oleh proses inisialisasi *browser*, mekanisme tile streaming, dan kondisi cache selama pengujian. Dengan demikian, efisiensi ukuran data dan efisiensi waktu pemuatan merupakan dua aspek yang tidak selalu berbanding lurus dalam visualisasi 3D berbasis web.

Secara keseluruhan, seluruh *workflow* memiliki waktu pemuatan di bawah 500 ms, yang menunjukkan bahwa model tiga dimensi dapat dimuat dengan cepat dan memberikan pengalaman visualisasi yang responsif.



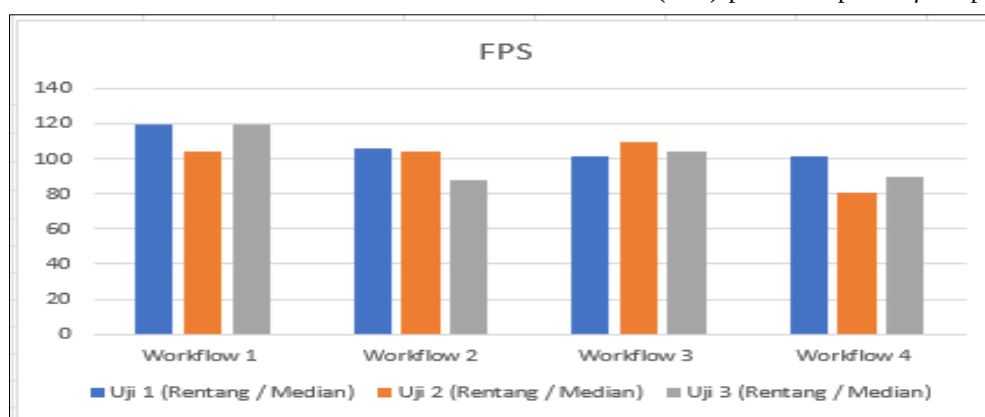
Gambar 6. Perbandingan Memory Usage pada Setiap Workflow

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 6, penggunaan memori pada seluruh workflow berada pada rentang 55,83–57,17 MB. Perbedaan penggunaan memori antar-workflow relatif kecil sehingga menunjukkan bahwa proses visualisasi memiliki kebutuhan memori yang relatif stabil.

Workflow 3 memiliki rata-rata penggunaan memori paling tinggi, yaitu sekitar 57 MB, sedangkan Workflow 4 menunjukkan penggunaan memori rata-rata paling rendah, yaitu sekitar 56 MB. Workflow 1 dan Workflow 2 berada pada kisaran penggunaan memori sekitar 56–57 MB.

Perbedaan penggunaan memori yang tidak terlalu besar mengindikasikan bahwa setelah data dikonversi ke format 3D Tiles, *browser* hanya memuat bagian model yang diperlukan sesuai posisi kamera (*on-demand loading*). Dengan mekanisme tersebut, konsumsi memori menjadi relatif stabil meskipun ukuran *file* awal antar-workflow berbeda cukup signifikan.

Hasil ini menunjukkan bahwa optimasi geometri lebih berpengaruh terhadap efisiensi ukuran *file* dibandingkan terhadap konsumsi memori saat proses visualisasi berlangsung. Berikut merupakan hasil perbandingan *Frame rate* (FPS) pada setiap workflow pada Gambar 7.



Gambar 7. Perbandingan Frame rate (FPS) pada Setiap Workflow

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh *workflow* mampu menghasilkan nilai frame rate yang tinggi selama proses visualisasi. *Workflow* 1 memperoleh rata-rata 114,17 FPS, diikuti *Workflow* 3 dengan 104,83 FPS, *Workflow* 2 dengan 99,33 FPS, dan *Workflow* 4 dengan 90,44 FPS. Temuan ini sejalan dengan penelitian [7] yang menggunakan *frame rate* sebagai salah satu indikator untuk menilai performa *rendering* pada WebGIS berbasis CesiumJS.

Seluruh *workflow* menghasilkan nilai FPS yang berada jauh di atas 60 FPS, sehingga proses visualisasi dapat berlangsung secara *real-time* dengan animasi yang halus (*smooth*). Selama pengujian, interaksi pengguna berupa *rotate*, *zoom*, dan *pan* dapat dilakukan tanpa penurunan performa yang signifikan.

Workflow 1 menghasilkan nilai FPS tertinggi. Hal ini menunjukkan bahwa perangkat pengujian masih mampu merender model dengan jumlah *point cloud* yang besar tanpa mengalami penurunan performa. Sebaliknya, *Workflow* 4 menghasilkan FPS yang lebih rendah dibandingkan *workflow* lainnya, namun nilainya masih berada pada kategori sangat baik sehingga tetap memberikan pengalaman visualisasi yang nyaman bagi pengguna. Dengan demikian, proses optimasi dan konversi ke format 3D Tiles tidak menyebabkan penurunan performa visualisasi yang berarti.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai optimasi format data tiga dimensi untuk visualisasi *subsurface* berbasis WebGIS menggunakan format 3D Tiles, dapat disimpulkan bahwa proses optimasi geometri menggunakan metode *subsampling* dengan parameter 0,002 berhasil meningkatkan efisiensi data secara signifikan. Jumlah *point cloud* berkurang dari 19.322.093 titik menjadi 3.725.925 titik atau sekitar 80,72%, yang diikuti dengan penurunan ukuran *file* dari 534,38 MB menjadi 103,05 MB pada format LAS dan dari 175,11 MB menjadi 34,40 MB pada format LAZ. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode *subsampling* efektif dalam mengurangi kompleksitas data dengan tetap mempertahankan karakteristik geometris utama model Gua Barong secara visual. Temuan pengurangan kompleksitas ini sejalan dengan [15].

Penggunaan format LAZ juga terbukti lebih efisien dibandingkan format LAS. Pada data tanpa optimasi, format LAZ mampu mengurangi ukuran *file* sekitar 67,2% dibandingkan LAS tanpa mengubah jumlah *point cloud*. Selain itu, seluruh *workflow* berhasil dikonversi ke format 3D Tiles dan divisualisasikan dengan baik pada WebGIS berbasis CesiumJS. Penggunaan 3D Tiles untuk penyajian data 3D melalui Cesium sejalan dengan [6], [10], yang membahas pemanfaatan 3D Tiles dalam visualisasi 3D berbasis web.

Berdasarkan hasil evaluasi performa, *Workflow* 3 menunjukkan *loading time* rata-rata tercepat sebesar 237,00 ms, dibandingkan *Workflow* 2 sebesar 287,67 ms, *Workflow* 1 sebesar 375,67 ms, dan *Workflow* 4 sebesar 385,00 ms. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa penggunaan memori pada seluruh *workflow* relatif stabil pada kisaran 55,83–57,17 MB. Sementara itu, *nilai frame*

rate (FPS) seluruh *workflow* berada di atas 90 FPS, dengan *Workflow* 1 menghasilkan FPS tertinggi sebesar 114,17 FPS. Temuan bahwa *Workflow* 4 memiliki ukuran *file* paling kecil tetapi tidak memiliki *loading time* tercepat menunjukkan bahwa performa visualisasi tidak hanya dipengaruhi oleh ukuran data. Hasil ini konsisten dengan [7] mengenai pengaruh strategi pemuatan dan pengelolaan tile terhadap performa visualisasi CesiumJS.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi optimasi geometri, penggunaan format LAZ, dan konversi ke 3D Tiles mampu meningkatkan efisiensi penyimpanan data sekaligus mempertahankan kualitas visualisasi dan performa WebGIS. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa ukuran *file* yang lebih kecil tidak selalu menghasilkan waktu pemuatan yang lebih cepat. Temuan ini mengindikasikan bahwa performa visualisasi tidak hanya dipengaruhi oleh ukuran data, tetapi juga oleh mekanisme pengelolaan data pada format 3D Tiles, seperti struktur *tile* dan proses *streaming*, sehingga keduanya perlu dipertimbangkan secara bersamaan dalam pengembangan visualisasi tiga dimensi berbasis web.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, pengembangan penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada pengujian beberapa parameter *subsampling* yang berbeda sehingga dapat diperoleh konfigurasi optimasi yang memberikan keseimbangan terbaik antara efisiensi ukuran *file* dan kualitas visualisasi. Selain itu, pengujian performa sebaiknya dilakukan pada berbagai spesifikasi perangkat keras, sistem operasi, dan *browser* untuk mengetahui konsistensi performa visualisasi pada lingkungan penggunaan yang lebih beragam.

Penelitian selanjutnya juga disarankan untuk menambahkan parameter evaluasi lain, seperti penggunaan CPU, GPU, konsumsi *bandwidth* jaringan, serta kualitas geometri secara kuantitatif sehingga analisis performa menjadi lebih komprehensif. Mengingat hasil penelitian menunjukkan bahwa *Workflow* 4 memiliki ukuran *file* paling kecil namun tidak menghasilkan *loading time* tercepat, diperlukan kajian lebih lanjut mengenai pengaruh proses pembentukan 3D Tiles, struktur *tile*, dan mekanisme *cache browser* terhadap performa visualisasi.

Selain itu, metode yang dikembangkan dalam penelitian ini masih diuji pada satu objek studi, yaitu Gua Barong. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk menerapkan metode yang sama pada objek tiga dimensi dengan tingkat kompleksitas dan ukuran data yang berbeda agar validitas dan generalisasi hasil penelitian dapat ditingkatkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim penelitian 3D Connection yang telah membantu dalam proses akuisisi data di Gua Pawon dan Gua Barong.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Murtiyoso, J. Markiewicz, A. K. Karwel, P. Grussenmeyer, and P. Kot, "Comparison of state-of-the-Art multi-view stereo solutions for close range heritage documentation," in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, International Society for

- Photogrammetry and Remote Sensing, Feb. 2024, pp. 317–323. doi: 10.5194/isprs-Archives-XLVIII-2-W4-2024-317-2024.
- [2] L. Gao, Y. Zhao, J. Han, and H. Liu, “Research on Multi-View 3D Reconstruction Technology Based on SFM,” *Sensors*, vol. 22, no. 12, Jun. 2022, doi: 10.3390/s22124366.
 - [3] E. Balloni, L. Gorgoglione, M. Paolanti, A. Mancini, and R. Pierdicca, “Few shot photogrammetry: A comparison between nerf and mvsv-sfm for the documentation of cultural heritage,” in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Jun. 2023, pp. 155–162. doi: 10.5194/isprs-Archives-XLVIII-M-2-2023-155-2023.
 - [4] M. Lu *et al.*, “Web-based real-time visualization of large-scale weather radar data using 3D tiles,” *Transactions in GIS*, vol. 25, no. 1, pp. 25–43, Feb. 2021, doi: 10.1111/tgis.12638.
 - [5] W. Zhan, Y. Chen, and J. Chen, “3d tiles-based high-efficiency visualization method for complex bim models on the web,” *ISPRS Int. J. Geoinf.*, vol. 10, no. 7, Jul. 2021, doi: 10.3390/ijgi10070476.
 - [6] Y. Chen, E. Shooraj, A. Rajabifard, and S. Sabri, “From IFC to 3D tiles: An integrated open-source solution for visualising BIMs on cesium,” *ISPRS Int. J. Geoinf.*, vol. 7, no. 10, Oct. 2018, doi: 10.3390/ijgi7100393.
 - [7] K. T. Suhari, Y. Cheline, J. Owa, and S. E. Prabawa, “RENDERING PERFORMANCE ANALYSIS OF SMARTPHONE LIDAR 3D MODELS IN AN OPEN-SOURCE WEBGIS,” vol. 11, no. 1, 2026.
 - [8] T. Seto, Y. Shiwaku, T. Miyauchi, D. Yoshida, and Y. Nishimura, “Assessment of Display Performance and Comparative Evaluation of Web Map Libraries for Extensive 3D Geospatial Data.”
 - [9] D. Zhang, Y. Wu, Y. Ni, T. Zhang, and C. Gao, “Optimization of Rendering Parameters of Cesium 3DTiles Model Based on Differential Evolution Algorithm,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 2, Jan. 2025, doi: 10.3390/app15020801.
 - [10] K. Woo, A. Onsen, and W. Kim, “Implementation of a 3D WebGIS for Dynamic Geo-Referencing of 3D Tiles on the Virtual Globe,” *Journal of Geographic Information System*, vol. 15, no. 05, pp. 440–457, 2023, doi: 10.4236/jgis.2023.155022.
 - [11] M. Hillmann, M. Igelbrink, and T. Wiemann, “COMPUTING ARBITRARILY LARGE MESHES WITH LEVEL-OF-DETAIL SUPPORT FOR CESIUM 3D TILES,” in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Dec. 2022, pp. 109–116. doi: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W1-2022-109-2022.
 - [12] L. Marnat, C. Gautier, C. Colin, and G. Gesquiere, “PY3DTILERS: AN OPEN SOURCE TOOLKIT FOR CREATING AND MANAGING 2D/3D GEOSPATIAL DATA”, doi: 10.5194/isprs-annals-X-4.
 - [13] B. Fei, J. Xu, R. Zhang, Q. Zhou, W. Yang, and Y. He, “3D Gaussian as a New Era: A Survey,” Jul. 2024, doi: 10.1109/TVCG.2024.3397828.
 - [14] M. Kulawiak, M. Kulawiak, and Z. Lubniewski, “Integration, processing and dissemination of LiDAR data in a 3D web-GIS,” *ISPRS Int. J. Geoinf.*, vol. 8, no. 3, Mar. 2019, doi: 10.3390/ijgi8030144.
 - [15] M. Gong, Z. Zhang, and D. Zeng, “A new simplification algorithm for scattered point clouds with feature preservation,” *Symmetry (Basel)*, vol. 13, no. 3, pp. 1–15, Mar. 2021, doi: 10.3390/sym13030399.