

Rekonstruksi Fotogrametri Bangunan Cagar Budaya Stasiun Kalimenur Menggunakan Pendekatan *Low-cost Multi-instrument*

Renaldy Aditya Putra Ramadhan¹⁾, Salsabila Atalieani Andiana²⁾, Septiya Nur Hasmar³⁾

¹⁾ Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

²⁾ Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

³⁾ Departemen Teknik Arsitektur dan Perencanaan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

Corresponding Author: Muhammad Rifky Reza (Email: muhammad.rifky.r@mail.ugm.ac.id)

Abstract

Kalimenur Station is an inactive station that originally served as a train stop. The station is located in Sukoreno Village, Sentolo District, Kulon Progo Regency, Special Region of Yogyakarta. Due to its distinctive architectural design and being the only building in the Yogyakarta-Kulon Progo corridor constructed in the architectural style of the Staatspoorwegen (SS), the station building was designated as a Cultural Heritage Building (BCB) pursuant to Regent's Decree No. 586/A/2018 dated December 19, 2018. Rapid technological advancements have enabled the preservation of cultural heritage in digital form, including digital photography, augmented reality, and 3D modeling. These methods are employed to ensure public accessibility, prevent the risk of disappearance, and ensure long-term enjoyment. This study tests the capabilities of various camera types for 3D modeling of the Kalimenur Station Cultural Heritage Building using multi-instrument photogrammetry. This study uses three types of photo data with different tools and output specifications, namely mirrorless cameras, 360-degree cameras, and drones. The use of multiple instruments aims to extract the advantages of each type of tool to complement each other in the practice of 3D modeling of the Kalimenur Station. Photo processing into a 3D model is performed using the Structure-from-Motion Multi-View-Stereo (SfM-MVS) algorithm. The series of activities carried out were able to produce 3D models with sufficient completeness and visual quality, although the geometric accuracy could only reach the centimeter level. This method can be applied to quick mapping needs that require fast output. Workflow updates and improvements in tool quality and processing levels can be made to enhance the quality of the final product.

Keywords: *BCB Stasiun Kalimenur; drone; kamera 360; mirrorless; model 3D*

1. Latar Belakang

Menurut UU No.11 Tahun 2010, cagar budaya merupakan bentuk wujud pemikiran dan perilaku manusia yang signifikan dan berpengaruh terhadap berkembangnya kehidupan bermasyarakat serta harus dilestarikan untuk memajukan kebudayaan nasional demi kemakmuran bangsa dan negara. Cagar budaya dapat dibagi menjadi benda, bangunan, struktur, situs, dan kawasan cagar

budaya. Dalam UU No.11 Tahun 2010 pula, tertulis bahwa bangunan cagar budaya merupakan objek yang mengandung unsur dinding/beratap dan pernah digunakan untuk memenuhi tujuan tertentu.

Bangunan Stasiun Kalimenur merupakan salah satu contoh Bangunan Cagar Budaya (BCB). Stasiun/Halte Kalimenur ini merupakan stasiun non aktif yang semula berfungsi sebagai perhentian kereta api yang terletak di Kalurahan

Sukoreno, Kapanewon Sentolo, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta.

Menurut Dinas Kebudayaan DIY (2023), Stasiun Kalimenur dibangun pada tahun 1887, bersamaan dengan pembangunan jalur kereta api Yogyakarta - Kroya oleh perusahaan kolonial *Staatspoorwegen* (SS). Stasiun ini sempat hampir hancur akibat adanya perang revolusi pada tahun 1948. Namun, pada tahun 1954, Stasiun Kalimenur dibangun kembali oleh Djawatan Kereta Api (DKA) dan bisa kembali beroperasi. Meskipun demikian, sejak tahun 1974, Stasiun Kalimenur tidak lagi beroperasi sebagai tempat perhentian kereta. Hingga saat ini, bangunan tersebut hanya menjadi bangunan kosong yang dipenuhi dengan berbagai macam vandalisme.

Secara keseluruhan, Bangunan Stasiun Kalimenur masih menunjukkan arsitektur khas stasiun kecil yang dibangun oleh perusahaan *Staatspoorwegen* (SS), seperti adanya lubang angin berderet sepanjang ruang tunggu berbentuk empat persegi panjang vertikal di bangunan utamanya serta terdapat aksent lingkaran timbul dan bentuk atap kampung di ujung bagian atas. Karena bentuk arsitekturalnya yang khas serta menjadi satu-satunya bangunan bergaya arsitektur *Staatspoorwegen* (SS) di lintas Yogyakarta - Kulon Progo, bangunan stasiun ini kemudian diresmikan menjadi BCB menurut SK Bupati Nomor: 586/A/2018 Tanggal 19 Desember 2018.

Menurut Kalay (2008) dalam Revianur (2020), pemanfaatan teknologi digital dapat digunakan untuk tujuan pelestarian cagar budaya dengan cara mereplikasi dan memvisualisasikan cagar budaya tersebut. UNESCO membuat peraturan tentang pelestarian cagar budaya dalam bentuk digital untuk memastikan aksesibilitas publik, mencegah ancaman lenyap sehingga tidak dapat dinikmati oleh generasi penerus, dan kesinambungan digital dalam jangka panjang (UNESCO, 2003). Dengan adanya digitalisasi cagar budaya Bangunan Stasiun Kalimenur, diharapkan dapat meningkatkan manajemen pengetahuan, pariwisata dan bisnis, serta pendidikan. Digitalisasi cagar budaya yang dimaksud, dapat berupa fotografi digital, *augmented reality*, ataupun pemodelan 3 dimensi. Dalam tulisan ini, penulis lebih berfokus pada digitalisasi menggunakan pemodelan 3 dimensi.

Teknologi LiDAR (*Light Detection and Ranging*) merupakan pemindaian laser yang menghasilkan data 3 dimensi berupa *point cloud* 3D. LiDAR merupakan sensor aktif yang dapat memancarkan laser *infrared* dan mengukur respon pantulan kembali ke sensor. Apabila dikombinasikan dengan penentuan lokasi yang presisi dan informasi kecepatan, LiDAR dapat digunakan untuk mengukur detail topografi dengan ketelitian tinggi (Arrofiqoh, E. N., dkk, 2022). Dengan teknologi ini memungkinkan pelestari untuk merekonstruksi struktur BCB yang kompleks dengan tingkat detail yang tinggi. Proses ini juga dapat dilakukan untuk mengambil tindakan konservasi yang tepat waktu dengan tujuan melindungi situs-situs bersejarah dari kerusakan atau degradasi yang mungkin terjadi akibat faktor-faktor lingkungan atau aktivitas manusia. Akan tetapi, dengan semua kemampuan tersebut, LiDAR hadir dengan harga yang kurang terjangkau karena mahalnya instrumen yang digunakan. Dengan berkembang dan populer-nya fotogrametri sebagai sarana rekonstruksi 3D digital objek dunia nyata, banyak inovasi untuk mereplikasi hasil yang sama dengan metode yang lebih terjangkau. Berkembangnya algoritma fotogrametri seperti *Structure-from-Motion Multi-View-Stereo* memungkinkan penggunaan peralatan fotografi taraf konsumen dalam kegiatan pemodelan 3D objek dunia nyata (Janiszewski, 2022).

Tulisan ini menguji kemampuan beberapa jenis instrumen kamera untuk tujuan pemodelan 3D BCB Stasiun Kalimenur melalui metode fotogrametri multi-instrumen. Metode ini menawarkan pendekatan yang holistik dengan memanfaatkan keunggulan UAV yang mampu melakukan pengambilan gambar dari ketinggian sehingga mampu menangkap foto bagian bangunan yang sulit dilihat pada ketinggian tanah (Sun & Zheng, 2018), kamera *mirrorless* dengan kualitas dapat ditingkatkan dengan cara melakukan pembidikan ke objek secara konvergen dari kamera agar diperoleh ukuran lebih. Kelebihan tertuju jika objek yang akan diukur sulit untuk dijangkau dan atau memiliki dimensi yang kecil sehingga mampu mengambil detail eksterior dengan resolusi tinggi (Hosken, 2021)(Kafiar dkk., 2020), serta sistem multi-kamera 360 derajat (kamera 360) yang mampu melakukan pengambilan gambar interior ke segala arah dengan cepat sehingga meningkatkan

efektifitas akuisisi data (Barazzetti dkk., 2020) (Fangi dkk., 2018) (Janiszewski dkk., 2022). Posisi kamera diatur untuk mendapatkan sudut pandang terbaik saat memotret di sekitar objek. Ini dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh area objek terdokumentasi secara menyeluruh. Setelah proses pemotretan selesai, data yang dikumpulkan kemudian diproses menggunakan algoritma fotogrametri jarak dekat. Dalam rekonstruksi 3D menggunakan multi-instrument, penggunaan peralatan murah akan memiliki kelebihan tertentu, terutama berkaitan dengan resolusi foto, yang kemungkinan besar akan berdampak pada akurasi model 3D. Tulisan ini berfokus pada praktik pemodelan 3D BCB sekaligus menguji tiga jenis peralatan *low-cost* dalam kemampuannya untuk saling melengkapi satu sama lain dalam kegiatan dokumentasi 3D BCB Stasiun Kalimenur.

2. Data dan Metode

Pada penelitian ini, pemodelan 3D Stasiun Kalimenur dilakukan dengan menggunakan tiga jenis data foto dengan alat dan spesifikasi keluaran yang berbeda-beda, yaitu kamera *mirrorless*, kamera 360 derajat, dan *drone*. Tiga alat yang digunakan tersebut ditunjukkan pada [Gambar 1](#). Penggunaan ketiga alat bertujuan untuk meningkatkan efektivitas akuisisi data dengan mengekstrak kelebihan masing-masing alat untuk pemodelan bagian tertentu dari bangunan. Selanjutnya, pemrosesan foto menjadi model 3D bangunan dilakukan menggunakan algoritma *Structure-from-Motion Multi-View-Stereo* (SfM-MVS).

Untuk dapat mengombinasikan data dari ketiga alat menjadi satu model dengan pencahayaan yang seragam, sangat penting untuk melakukan akuisisi data dengan cepat dan efektif untuk mencegah variasi pencahayaan yang terlalu ekstrem akibat sinar matahari. Seluruh foto diambil dengan format kompresi JPG untuk menjaga ukuran *file* tetap kecil. Tiap keluaran data dari masing-masing instrumen akan diolah secara terpisah dan diuji akurasi geometrinya menggunakan *scale bar* yang diukur di lokasi. Penggabungan ketiga model dilakukan di akhir pemrosesan dengan menggunakan titik-titik penanda (*marker*) yang diambil dari titik-titik tumpang (*overlap*) dan diidentifikasi secara manual di model.

Lokasi Penelitian dan Analisis Arsitektur Bangunan

Lokasi penelitian berada di Bangunan Stasiun Kalimenur, Dusun Wora-Wari, Kalurahan Sukoreno, Kapanewon Sentolo, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Bangunan ini terletak di samping rel aktif petak Stasiun Setolo - Stasiun Wates, tepatnya pada KM 520 jalur Surabaya Gubeng - Gambir dan terletak pada ketinggian 35 meter di atas permukaan laut (PT KA, 2004). Stasiun ini memiliki bentuk persegi panjang dengan ukuran 1.640 x 540 cm serta ketinggian dinding sekitar 7 meter tidak bertingkat. Arsitektur Bangunan Stasiun Kalimenur memiliki atap berbentuk pelana bergenting *Flame* yang berbahan dasar tanah liat (Dinas Kebudayaan DIY, 2023). Saat ini, Bangunan Cagar Budaya ini menunjukkan tanda-tanda kerusakan dan penghancuran, terutama pada lantai dan langit-langit yang terbuat dari anyaman bambu. Bangunan ini tidak memiliki lampu atau sumber pencahayaan tambahan lainnya sehingga hasil akuisisi data sangat bergantung pada kondisi pencahayaan alami yang cukup namun tidak menimbulkan perbedaan pencahayaan yang ekstrem antara interior dan eksterior.

Dinding bangunan Stasiun Kalimenur terbagi menjadi empat bagian, dengan masing-masing bagian dibatasi oleh pilar berukuran 43 x 43 cm ([Gambar 3](#) dan [Gambar 4](#)). Setiap pilar memiliki konsol kayu sebagai penyangga atap. Terdapat 9 ventilasi berjejer pada tiap sisi panjang dinding (utara dan selatan). Sementara itu, terdapat tulisan "Kalimenur +35" pada bagian atas dinding sisi lebar (timur dan barat).

Bangunan Stasiun Kalimenur ini memiliki bentuk atap pelana yang sudah mengalami kerusakan hingga terlihat kerangka atapnya ([Gambar 5](#)). Ruang di sisi barat telah hancur. Meskipun demikian, masih dapat ditemukan sisa-sisa ubin di bagian bawah dinding-dinding ([Gambar 5](#)). Di dinding timur ruangan ini terdapat jendela kayu yang digunakan sebagai loket.

Bangunan stasiun ini menampilkan gaya arsitektur *Indies* yang memadukan elemen Eropa dan tradisional Jawa. Contohnya adalah atap pelana dengan genteng *flame* dan langit-langit anyaman bambu. Ruang tunggu dan ruang kepala stasiun masih mempertahankan desain aslinya dengan lantai tegel dan dinding plesteran putih. Stasiun ini dikelilingi oleh pepohonan dan sawah, menciptakan suasana pedesaan yang tenang.

Stasiun Kalimenur merupakan contoh baik dari arsitektur *Indies* yang terjaga dengan baik, dengan nilai estetika dan sejarah yang tinggi. Sebagai *landmark* penting di Sentolo, stasiun ini adalah bagian penting dari cagar budaya arsitektur yang perlu dilestarikan. Diperlukan upaya pelestarian dan revitalisasi agar stasiun ini dapat terus dinikmati oleh generasi mendatang.

Akuisisi Data dengan Kamera *Mirrorless*

Akuisisi data dilakukan menggunakan kamera *mirrorless* Canon EOS M10. Kamera ini merupakan kamera resolusi tinggi dengan sensor CMOS berukuran 22,3 x 14,9 mm. Kamera ini digunakan untuk mengambil foto dengan resolusi 4320 x 2432 piksel. Eksposur kamera diatur manual dengan menyesuaikan kondisi pencahayaan ketika proses berlangsung. Parameter eksposur yang digunakan adalah bukaan/*aperture* F7.1, kecepatan *shutter* 1/200 detik dan ISO sebesar 100. Kamera *mirrorless* digunakan untuk mengambil foto dinding eksterior bangunan dengan resolusi tinggi berformat JPG.

Akuisisi data dilakukan dengan mengambil foto secara memutar mengelilingi bangunan stasiun. Foto diambil secara merata setiap beberapa langkah hingga seluruh dinding eksterior bangunan terambil secara lengkap. Untuk mendapatkan tekstur yang lebih tajam, beberapa foto *close up* lukisan serta tulisan yang menempel pada dinding juga diambil.

Akuisisi Data dengan Kamera 360 Derajat

Insta360 One X3 merupakan sistem kamera 360 derajat berjenis *dual-lens* dengan sensor 0,5 inci yang mampu menangkap foto 360 derajat dengan resolusi 72 MP. Untuk menciptakan efek panorama *spherical*, kedua lensa menggunakan lensa cembung ekstrem yang mampu menciptakan bidang pandang selebar 180 derajat di kedua sisi. Kedua gambar kemudian digabungkan secara otomatis oleh kamera untuk mendapatkan foto panorama 360 derajat. Kamera ini memiliki sistem *gyroscope* yang mampu secara otomatis menstabilkan foto sehingga menghasilkan gambar dengan horizon yang datar.

Akuisisi data dilakukan dengan menempatkan kamera pada sebuah *monopod* untuk menjaga kestabilan kamera selama proses eksposur. Hal ini dilakukan untuk meminimalisasi efek *motion blur* dan artefak pada lokasi *stitching* gambar dari dua foto yang

diambil. Kamera digunakan untuk mengambil foto interior bangunan karena kemampuannya mengambil foto ke segala arah (*omnidirectional*) dalam waktu yang sama sehingga mampu mempercepat proses akuisisi data.

Foto interior diambil dengan menempatkan kamera dalam posisi *grid* sebanyak 3 baris yang memanjang mengikuti bentuk persegi panjang dari bangunan. Untuk meningkatkan redundansi data, dilakukan 3 kali putaran pengambilan data menggunakan posisi kamera yang sama, tetapi dengan ketinggian *monopod* yang berbeda.

Setiap proses pemotretan, Insta360 melakukan pengambilan foto dengan format DNG (RAW) dan INSP (format Insta360). Konversi foto ke format JPG dapat dilakukan secara otomatis menggunakan perangkat lunak pendampingnya, yaitu Insta360 Studio. Perangkat ini juga digunakan untuk mengubah foto panorama *spherical* menjadi sebuah foto *equirectangular* /persegi panjang yang akan diproses oleh perangkat lunak fotogrametri.

Akuisisi Data dengan Kamera 360 Derajat

Akuisisi data dengan *drone* dilakukan untuk mengambil foto atap yang sulit dijangkau menggunakan kamera *mirrorless* atau kamera 360 derajat. Pengambilan foto dilakukan dengan *drone* berjenis *quadcopter*, yaitu DJI Air 2S. *Drone* ini memiliki kamera dengan sensor CMOS berukuran 1 inci dengan resolusi 20 MP. Eksposur manual diatur dengan parameter bukaan F2.8, kecepatan *shutter* 1/800 detik dan ISO 100.

Pengambilan foto dilakukan dengan jalur terbang berbentuk *grid* beberapa baris yang paralel dengan lebar stasiun dengan kamera yang dihadapkan tegak lurus ke arah bawah. Kamera diatur untuk melakukan pengambilan gambar secara otomatis setiap 3 detik. Kecepatan *drone* dijaga pada tingkat minimal untuk mengurangi potensi *motion blur*. Selain foto tegak lurus, beberapa foto melingkari bangunan stasiun dengan posisi kamera miring juga diambil untuk merekonstruksi lingkungan sekitar stasiun serta memastikan adanya *overlap* dengan data dari instrumen lain.

Akuisisi Data dengan Kamera 360 Derajat

Beberapa dimensi panjang pada bangunan stasiun diukur sebagai parameter pembandingan pada uji akurasi geometri. Uji geometri dilakukan pada bagian interior dan eksterior bangunan. *Scale bar* interior digunakan untuk

menguji akurasi hasil pemrosesan data foto 360 panorama *spherical*. Sementara itu, *scale bar* eksterior digunakan untuk menguji hasil pemrosesan data kamera *mirrorless* dan *drone* (pemrosesan data *drone* dilakukan pada hasil pemodelan dinding bangunan yang tertangkap kamera *drone* karena tidak adanya alat yang tersedia untuk melakukan pengukuran atap bangunan). Uji geometri akan dilakukan dengan menghitung *root mean square error* (RMSE) dan *mean absolute error* (MAE). RMSE dihitung untuk mendapatkan sensitivitas yang lebih sehingga dimensi-dimensi dengan kesalahan yang besar dapat dilihat dengan mudah, sementara MAE dihitung untuk lebih mudah mengintrepetasi rerata kesalahan pada model (Yang dkk., 2021). Rumus RMSE dan MAE adalah sebagai berikut

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

Rekonstruksi 3D

Rekonstruksi 3D dilakukan menggunakan perangkat lunak Agisoft Metashape. Pemrosesan dilakukan menggunakan sebuah laptop dengan CPU AMD Ryzen7 4800H @2.9GHz, RAM 8 GB dan GPU NVIDIA GeForce RTX3050 dengan kapasitas 8GB. Rekonstruksi 3D masing-masing jenis data dilakukan secara terpisah dengan proses pembentukan *tie point* dilakukan pada pengaturan “*high*” untuk menghasilkan *sparse point cloud*. Pada penelitian ini, tidak ada titik kontrol tanah (TKT) yang dipasang di lokasi. Pada data dari kamera *mirrorless* dan *drone*, dilakukan proses optimisasi penempatan kamera untuk mendapatkan *alignment* yang lebih akurat.

Selanjutnya, dilakukan pembentukan *dense point cloud* pada pengaturan “*medium*”. Proses ini dilakukan dengan memproyeksikan titik-titik fitur terdeteksi ke ruang 3D. Setelah proses ini selesai, dilakukan proses *chunk alignment*. Tujuannya adalah untuk memposisikan tiga *dense point cloud* (*chunk*) yang telah terbentuk menjadi sebuah model *dense point cloud* lengkap. Proses ini dilakukan dengan mengidentifikasi titik-titik yang

bertampalan pada dua atau lebih *chunk* dan menandainya secara manual di tiap *chunk*.

Selanjutnya, *dense point cloud* yang telah digabungkan terlebih dahulu difilter pada *workspace* masing-masing dengan melakukan penghapusan titik-titik *noise* dan titik-titik yang hanya digunakan untuk proses *chunk alignment*. *Dense point cloud* yang telah dibersihkan kemudian diolah lebih lanjut pada proses *mesh generation* dan juga *texture generation*. *Mesh generation* dilakukan pada jumlah poligon medium dengan map tekstur beresolusi tertentu (*map texture* pada beberapa tingkatan resolusi akan diekspor untuk menemukan resolusi optimum yang seimbangan antara jumlah piksel dan ketajamannya).

3. Hasil dan Pembahasan

Akuisisi data *Multi-instrument*.

Kegiatan akuisisi data dengan 3 alat berbeda (*multi-instrument*) menghasilkan total sebanyak 253 buah foto dalam durasi akuisisi data kurang dari satu jam. Foto-foto ini terdiri dari foto eksterior yang ditangkap dengan kamera *mirrorless*, foto interior dengan kamera 360 derajat dan foto atap serta area sekitar dengan *drone*. Seluruh foto diekspor dalam format JPG untuk diolah menggunakan proses fotogrametri. Karakteristik akuisisi data ditinjau dari jumlah foto terambil, resolusi dan durasi akuisisi data disajikan pada [Tabel 1](#).

Pengukuran Scale Bar

Pengukuran dilakukan pada 6 ukuran *scale bar* interior dan 5 ukuran *scale bar* eksterior. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan pita ukur dan memanfaatkan objek-objek pada bangunan yang dapat dengan mudah diidentifikasi pada model ([Gambar 6](#)). Dimensi-dimensi diambil tersebar secara merata di seluruh bagian bangunan untuk memastikan kelima ukuran dapat mewakili keseluruhan bagian bangunan yang diuji. Hasil pengukuran *scale bar* dapat dilihat pada [Tabel 2](#).

Rekonstruksi 3D dan Uji Akurasi Geometri

Rekonstruksi 3D dilakukan dengan serangkaian proses fotogrametri yang terdiri dari deteksi fitur, *camera alignment*, plotting *sparse* dan *dense point cloud*, *mesh generation*, dan *texture generation*. Proses ini merupakan memakan

waktu cukup lama karena dilakukan pada perangkat keras yang kurang mumpuni. Durasi pemrosesan foto pada tiap tahapan dapat dilihat pada [Tabel 3](#). Total durasi pengolahan adalah kurang dari 2 jam. Pada pekerjaan yang menuntut kecepatan, hasil ini merupakan hasil yang menjanjikan untuk dapat diterapkan pada keperluan *quick mapping*. Akan tetapi, apabila durasi pengolahan yang diberikan lebih lama, masih sangat mungkin dilakukan pengolahan pada taraf kualitas yang lebih tinggi untuk menghasilkan model yang lebih baik.

Seluruh data mampu diolah dan direkonstruksi sesuai dengan area peruntukannya beserta lokasi-lokasi pertampalan di sekitarnya yang mana tiap pemrosesan mampu mendeteksi lebih dari 5 juta titik dengan pemrosesan foto panorama *spherical* berhasil mengeplot 12 juta titik, meskipun memiliki cakupan area yang paling sempit. Hal ini juga dikonfirmasi dengan lebih tingginya tingkat kepadatan titik pada hasil pemrosesan foto 360. Sementara itu, rendahnya kepadatan titik pada pemrosesan *drone* diakibatkan oleh faktor ketinggian terbang saat akuisisi data. Hasil rekonstruksi 3D masing-masing area dapat dilihat pada [Gambar 7](#). Ketiga *dense cloud* pada tahapan ini memiliki *noise* yang cukup signifikan, khususnya pada hasil pengolahan data foto 360 ([Gambar 8](#)). *Noise* direduksi semaksimal mungkin dengan menghapusnya secara manual pada tahap pembersihan *point cloud* ([Gambar 8](#)). Akan tetapi, sebelum pembersihan *noise* dilakukan, seluruh *chunk* terlebih dahulu disatukan dengan mengidentifikasi titik-titik yang bertampalan pada dua atau lebih model secara manual. Total terdapat 9 titik ikat yang digunakan di mana 4 di antaranya adalah titik pertampalan model interior dan eksterior, sementara 5 lainnya merupakan titik pertampalan model eksterior dengan model atap/lingkungan sekitar. Titik-titik ikat yang digunakan untuk penggabungan *dense point cloud* dapat dilihat pada [Gambar 9](#). Proses *mesh generation* dari data gabungan memakan waktu selama 4 menit 3 detik, dengan proses lanjutan yaitu *texture generation* yang terdiri dari *texture mapping*

dan *blending* membutuhkan waktu selama 41 menit 41 detik. Proses ini menghasilkan *mesh* dengan kepadatan titik sebesar 0,78 titik/cm².

Hasil uji akurasi geometri data foto 360 disajikan pada tabel 2. Ketiga data dapat diproses hingga mencapai akurasi pada taraf sentimeter. Ketelitian tertinggi ada pada produk hasil pengolahan kamera *mirrorless* dengan RMSE sebesar 4,9 cm dan MAE sebesar 4,4 cm. Ketiganya menghasilkan nilai RMSE dan MAE yang cukup konsisten dengan selisih berada pada kisaran 1 cm. Selain itu, ketiganya juga menghasilkan kepadatan titik yang merata pada area yang sesuai dengan peruntukannya ([Gambar 8](#)). Hal ini cukup krusial, khususnya pada tahapan *mesh generation* yang membutuhkan alur titik *dense point cloud* yang jelas untuk mencegah adanya kesalahan penghubungan titik pada proses pembuatan TIN (*Triangulated Irregular Network*). Kesalahan tersebut rawan terjadi pada rekonstruksi struktur dua sisi dan biasanya muncul dalam bentuk lubang pada permukaan yang seharusnya kontinyu. Seluruh spesifikasi keluaran dapat dilihat pada [Tabel 4](#).

Evaluasi Visual Model 3D

Evaluasi model 3D secara visual dilakukan untuk melihat kelengkapan geometri hasil pemodelan serta kualitas tekstur pada tiap level resolusi. Secara keseluruhan, model 3D yang dihasilkan memiliki kelengkapan yang cukup baik ([Gambar 10](#)) dengan kekurangan terbesar ada pada hilangnya beberapa balok kayu penyangga struktur atap di bagian atas bangunan ([Gambar 11](#)). Hal ini dapat menandakan kurangnya *coverage* foto pada area tersebut. Masalah ini dapat diatasi dengan mengambil lebih banyak foto secara *close-up* pada area penyangga atap. Hal yang sama dapat dikatakan untuk struktur yang memiliki geometri rumit seperti ventilasi dan tumpukan material. Selain itu, terdapat kesalahan geometri lain yang cukup signifikan tepatnya dibagian belakang plang penanda cagar budaya dan area dinding di dekat pohon ([Gambar 11](#)). Akan tetapi,

kesalahan ini murni disebabkan karena kurangnya *coverage* foto di area tersebut dan dapat diatasi dengan solusi yang sama dengan masalah sebelumnya.

Tekstur optimal berada pada kisaran 4K (4096 piksel x 4096 piksel) dimana apabila dilakukan ekspor dengan resolusi lebih tinggi, tidak ada peningkatan ketajaman visual yang signifikan ([Gambar 13](#)). Beberapa artefak dapat ditemukan pada area-area tertentu ([Gambar 12](#)) yang dapat mengindikasikan adanya kesalahan proyeksi titik ke ruang 3D atau kurangnya fitur yang terdeteksi di area tersebut. Meskipun begitu, artefak yang muncul tidak menimbulkan ambiguitas visual yang signifikan pada model 3D, sehingga bagian-bagian bangunan tetap dapat diidentifikasi secara jelas.

4. Kesimpulan

Dokumentasi 3D dengan metode fotogrametri jarak dekat merupakan salah satu upaya pelestarian Bangunan Cagar Budaya (BCB) Stasiun Kalimenur. Konsep *low-cost multi-instrument* dalam akuisisi data foto dapat menjadi solusi untuk pelaksanaan pemodelan 3D BCB dengan cepat dan efektif tanpa harus mengeluarkan biaya besar untuk pengadaan instrumen taraf survei seperti LiDAR. Mengacu pada kegiatan yang telah dilaksanakan, dapat dilihat bahwa metode ini mampu menghasilkan model dengan kualitas yang cukup baik, apabila ditinjau dari aspek kelengkapan geometri dan visual tekstur dengan durasi keseluruhan rangkaian kegiatan yang relatif cepat sehingga sangat cocok diterapkan pada pekerjaan *quick mapping*. Akan tetapi, alur kerja yang dipaparkan pada tulisan ini hanya mampu memproduksi model 3D dengan akurasi geometri pada tingkat sentimeter. Untuk pekerjaan yang lebih teliti seperti perencanaan teknik, metode ini belum mampu menggantikan survei LiDAR atau pemodelan 3D menggunakan satu jenis kamera resolusi tinggi saja. Untuk mencapai ketelitian yang lebih tinggi, perlu adanya evaluasi dan pemutakhiran alur kerja serta peralatan yang digunakan, baik peralatan utama (instrumen kamera), maupun juga peralatan pelengkap (instrumen pengukur dimensi/titik kontrol).

Apabila memungkinkan, sangat dianjurkan adanya pendirian titik kontrol di sekitar bangunan, termasuk di dalam bangunan (apabila pemodelan interior dibutuhkan). Pengukuran ini dapat dilakukan dengan menggunakan peralatan survei standar, seperti *GPS Receiver* yang mampu melakukan pengukuran koordinat tanah atau dengan mendirikan jaring titik kontrol lokal dengan *theodolite/total station*. Apabila pengukuran titik kontrol interior tidak memungkinkan, kontrol akurasi dapat diganti dengan melakukan pengukuran dimensi-dimensi panjang di dalam bangunan, identik dengan yang digunakan pada penelitian ini, tetapi dengan alat yang lebih akurat, seperti *electronic distance measurement*. Selain itu, penggunaan kualitas pemrosesan pada taraf yang lebih tinggi pada perangkat lunak fotogrametri memiliki potensi meningkatkan kualitas akhir produk yang dihasilkan, meskipun dengan mengorbankan durasi pemrosesan menjadi lebih lama atau dengan menggunakan perangkat keras dengan spesifikasi yang lebih tinggi sehingga meningkatkan biaya yang diperlukan.

Daftar Pustaka

- Barazzetti, L., Fangi, G., Remondino, F., & Scaioni, M. (2010). Automation in multi-image spherical photogrammetry for 3D architectural reconstructions. *Visual Analytics Science and Technology*, 1–6. <https://doi.org/10.2312/pe/vast/vast10s/075-081>
- Dinas Kebudayaan DIY. (2023). Bangunan Stasiun Kalimenur. Diakses 19 Februari 2024, dari Jogjaprovo.go.id website: <https://jogjacagar.jogjaprovo.go.id/detail/2621/stasiun-kalimenur>
- Fangi, G., Pierdicca, R., Sturari, M., & Malinverni, E. S. (2018). Improving Spherical Photogrammetry Using 360° Omni-cameras: Use Cases and New Applications. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII–2, 331–337. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-2-331-2018>.
- Hosken, J. (2021). 3D Reality Modelling for

- Heritage Building Preservation and Reconstruction.
- Indonesia. Undang-Undang Nomor 11 Tahun 2010 tentang Cagar Budaya. Lembaran Negara RI Tahun 2010 Nomor 130, Tambahan Lembaran RI Nomor 5168. Sekretariat Negara. Jakarta.
- Janiszewski, M., Torkan, M., Uotinen, L., & Rinne, M. (2022). Rapid Photogrammetry with a 360-Degree Camera for Tunnel Mapping. *Remote Sensing*, 14(21), 5494. <https://doi.org/10.3390/rs14215494>
- Kalurahan Sukoreno. (2020). Stasiun Tahu, Pernah Dibom Belanda Kini Lapuk Dimakan Usia. Diakses 19 Februari 2024, dari Website Resmi Kalurahan Sukoreno website: <https://sukoreno-kulonprogo.desa.id/index.php/artikel/2020/2/13/stasiun-tahu-pe-riah-di-bombelanda-kini-lapuk-di-makan-usia>
- Kantor Pusat PT Kereta Api (Persero). (2004). *Buku Jarak Singkat Bagi Angkutan Penumpang*. <https://www.zwp-lbstudie.nl/ned-indie/history/1979spoorwegen-java/1979-Kereta-Api-Jawa.pdf>
- Kapanewon Sentolo. (2021). Stasiun Kereta Api Sentolo Bukti Sejarah Yang Masih Utuh. Diakses 19 Februari 2024, dari Kulonprogokab.go.id website: <https://sentolo.kulonprogokab.go.id/detil/183/stasiun-kereta-api-sentolo-bukti-sejarah-yang-masih-utuh>
- Kafiar, M. T. (2020). Visualisasi 3D *Modelling* dari Hasil Kombinasi Kamera DSLR dan UAV dengan Metode *Close Range Photogrammetry* (Studi Kasus: Objek Plengsengan, Bendungan Sengkaling, Desa Tegal Gondo, Kecamatan Karang Ploso, Kabupaten Malang). Institut Teknologi Nasional Malang.
- Revianur, A. (2020). Digitalisasi Cagar Budaya di Indonesia: Sudut Pandang Baru Pelestarian Cagar Budaya Masa Hindu-Buddha di Kabupaten Semarang. *Bakti Budaya*, 3(1), 90–101.
- Sun, Z., & Zhang, Y. (2018). Using drones and 3D modeling to survey Tibetan architectural heritage: A case study with the multi-door stupa. *Sustainability*, 10(7), 2259.
- UNESCO. (2003). Charter on the preservation of the digital heritage. Paris: UNESCO.

Daftar Gambar

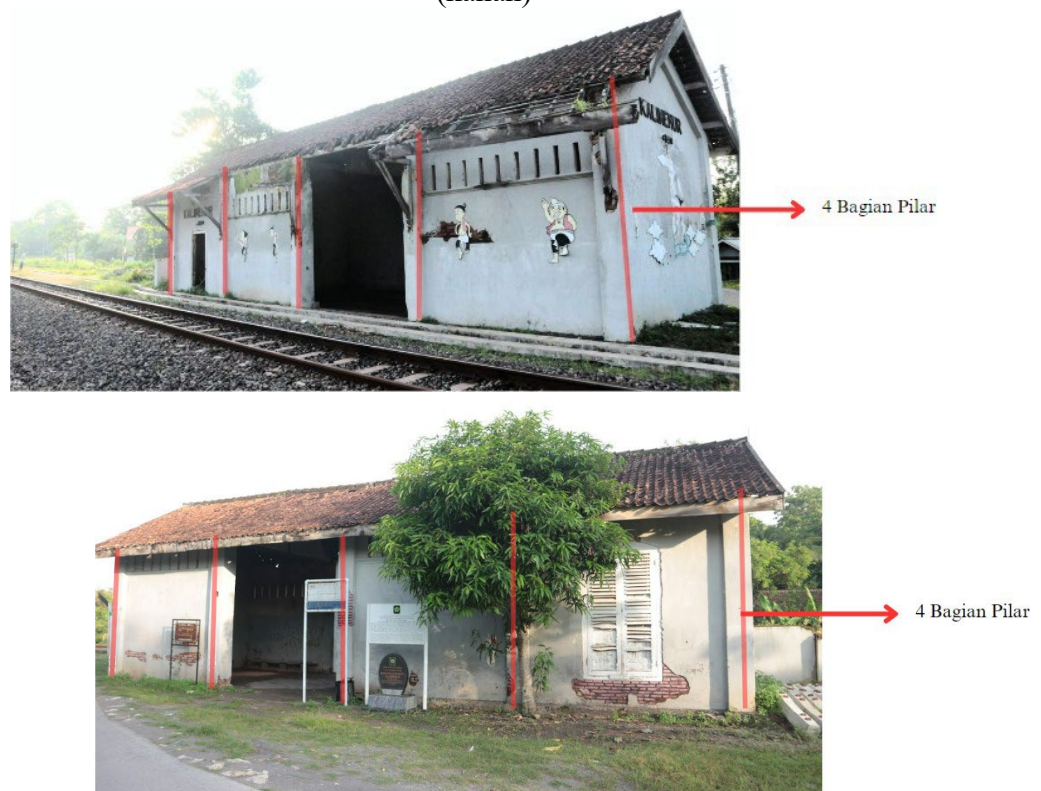


Gambar 1. Tiga alat yang digunakan untuk proses akuisi data, yaitu (dari kiri ke kanan) Canon EOS M10 (*mirrorless*), Insta360 One X3 (kamera 360 derajat) dan DJI Air 2S (*drone*)

Sumber: shutterbug.com, insta360.com dan dji.com



Gambar 2. Eksterior bangunan sisi selatan (kiri) dan eksterior bangunan sisi utara (kanan)



Gambar 3. Dinding sisi utara (atas) Dinding sisi selatan (bawah)



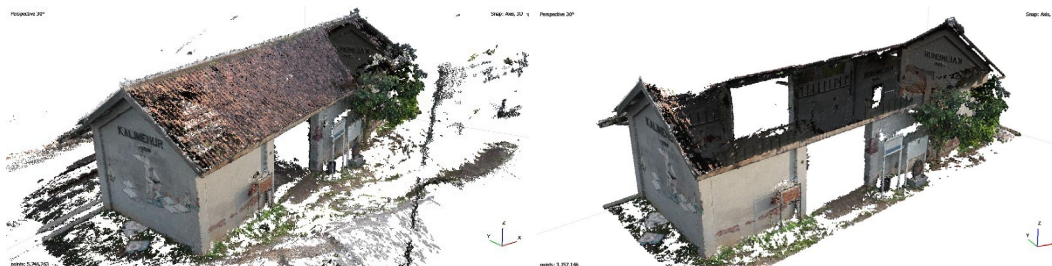
Gambar 4. Dinding sisi barat (kiri) dan dinding sisi timur (kanan)



Gambar 5. Atap bangunan (kiri) dan interior bangunan (kanan)



Gambar 6. Pengukuran *check scale bar* dilakukan pada fitur-fitur menonjol dan mudah diidentifikasi pada foto dan model.

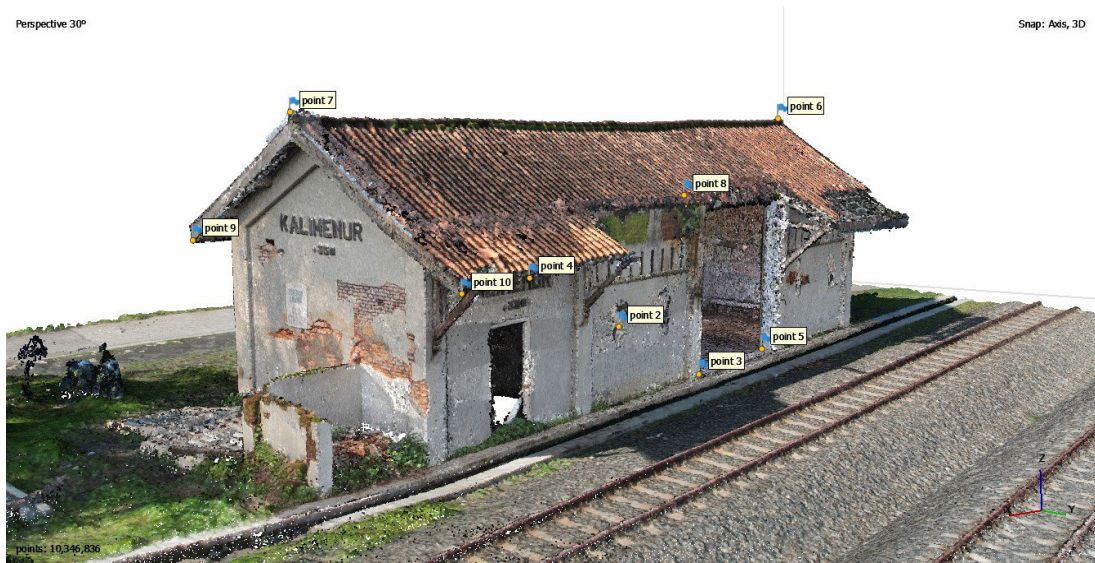


Gambar 7. Hasil pemrosesan foto pada tahapan *dense point cloud* (kiri) dan hasil setelah proses pembersihan (kanan) pada data (dari atas ke bawah) kamera *mirrorless* (eksterior), kamera 360



Gambar 8. Interior bangunan hasil pemrosesan foto 360. *Noise* dapat dilihat sebagai bercak hitam yang berada disekeliling model.





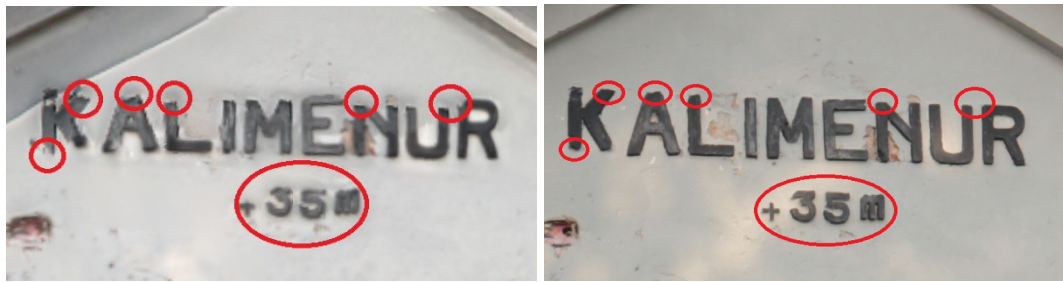
Gambar 9. Sebaran titik ikat antar model dilihat dari sisi jalan (atas) dan sisi peron (bawah) bangunan stasiun.



Gambar 10. Hasil penggabungan model menjadi sebuah *mesh* BCB Stasiun Kalimenur (dari kiri ke kanan dan atas ke bawah) *view* bagian atas, eksterior, interior menghadap timur dan interior menghadap barat.



Gambar 11. Kesalahan pemodelan *mesh* pada penyangga atap stasiun (kiri) dan kesalahan bagian belakang plang penanda (kanan) akibat kurangnya foto yang diambil pada area tersebut



Gambar 12. Kesalahan *texture mapping* pada tulisan “KALIMENUR +35 M” menyebabkan terjadinya artefak (kiri) pada tekstur yang diproduksi dibandingkan dengan keadaan asli di lapangan (kanan).



Gambar 13. Perbandingan ketajaman tekstur pada tiap tingkatan resolusi. (dari kiri ke kanan) Resolusi 2K, 4K dan 8K. Terlihat jelas peningkatan ketajaman dari 2K ke 4K. Namun, tidak ada peningkatan yang signifikan pada tekstur 8K dibandingkan 4K.

Daftar Tabel

Tabel 1. Perbandingan karakteristik akuisisi data tiap alat

Alat	Jumlah Foto	Resolusi (piksel x piksel)	Durasi akuisisi
Canon EOS M10	93	4320 x 2432	19 menit
Insta360 One X3	77	11968 x 5984	23 menit
DJI Air 2S	83	5472 x 3648	6 menit

Tabel 2. Ukuran *check scale bar* dengan hasil pengujian geometri model

Scale bar	Panjang Asli (m)	Data	Panjang model (m)	Error (m)	Error ² (m ²)
1	4,590	Insta360 X3	4,655	0,065	0,004
2	3,598	Insta360 X3	3,626	0,028	0,001
3	1,301	Insta360 X3	1,362	0,061	0,004
4	3,576	Insta360 X3	3,593	0,017	0,000
5	12,670	Insta360 X3	12,626	-0,044	0,002
6	12,682	Insta360 X3	12,567	-0,115	0,013
11	1,448	EOS M10	1,458	0,010	0,000
12	4,970	EOS M10	4,921	-0,049	0,002
13	3,579	EOS M10	3,621	0,042	0,002
14	1,110	EOS M10	1,150	0,040	0,002
15	3,108	EOS M10	3,187	0,079	0,006
11	1,448	Air 2S	1,496	0,048	0,002
12	4,970	Air 2S	5,036	0,066	0,004
13	3,579	Air 2S	3,601	0,022	0,000
14	1,110	Air 2S	1,025	-0,085	0,007
15	3,108	Air 2S	3,056	0,003	0,003

Tabel 3. Durasi pemrosesan tiap jenis data pada tiap tahapan pemrosesan

Proses	Durasi Pemrosesan		
	Canon EOS M10	Insta360 X3	DJI Air 2S
<i>Image alignment</i>	4 menit 2 detik	9 menit 33 detik	4 menit 29 detik
<i>Dense cloud generation</i>	4 menit 10 detik	46 menit 16 detik	12 menit 54 detik

Tabel 4. Spesifikasi keluaran pemrosesan tiap jenis data

Parameter	Canon EOS M10	Insta360 X3	DJI Air 2S
Jumlah titik asli	5.746.263	12.227.748	10.652.503
Jumlah titik (setelah dibersihkan)	3.157.146	4.851.089	2.338.601
Kepadatan titik	1,18 titik/cm ²	1,75 titik/cm ²	0,21 titik/cm ²
<i>RMSE</i>	4,9 cm	5,9 cm	5,8 cm
<i>MAE</i>	4,4 cm	4,7 cm	5,5 cm