



Pemanfaatan Drone Oblique Photogrammetry dan WebGIS dalam Pembangunan Digital Twin Kota Malang

Ketut Tomy Suhari¹, Dedy Kurnia Sunaryo², Hery Purwanto³, Luh Kadek Dera Erlinda⁵

^{1,2,3,5,4} Program Studi Teknik Geodesi, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Malang, Indonesia

e-mail: ksuhari@lecturer.itn.ac.id

ABSTRAK. Digital Twin merupakan representasi virtual dari objek fisik yang memungkinkan pemantauan dan analisis secara real-time. Kebutuhan akan kota cerdas dan berkelanjutan di negara berkembang menekankan pentingnya data geospasial yang akurat dan terkini, namun penelitian terkait Digital Twin di konteks ini masih relatif jarang dilakukan. Penelitian ini bertujuan menunjukkan potensi fotogrametri oblique menggunakan wahana udara nirawak untuk membangun Digital Twin kawasan perkotaan di Kota Malang, Indonesia. Data diperoleh melalui beberapa kali penerbangan drone dan diproses menjadi model 3D, ortofoto, serta model elevasi digital yang selanjutnya diintegrasikan ke dalam platform WebGIS berbasis CesiumJS untuk visualisasi interaktif dan kolaborasi daring. Hasil uji akurasi menunjukkan bahwa model yang dihasilkan memenuhi standar Badan Informasi Geospasial, sehingga layak digunakan untuk pemetaan detail wilayah perkotaan. Temuan ini menegaskan kelayakan penerapan Digital Twin di negara berkembang, sekaligus memperlihatkan potensinya dalam mendukung kadaster 3D, pemantauan infrastruktur, serta perencanaan kota berbasis data menuju tata kelola perkotaan yang lebih adaptif, partisipatif, dan berkelanjutan.

Kata kunci: Digital Twin; Trinity Pro; 3D WebGIS; Oblique Photogrammetry; Kadaster 3D

PENDAHULUAN

Digital Twin merupakan konsep kembar digital yang berperan penting dalam mewujudkan kota cerdas (smart city). Digital Twin didefinisikan sebagai representasi virtual dinamis dari sistem fisik beserta lingkungan dan proses operasionalnya, yang terus tersinkronisasi dengan dunia nyata secara real-time (Weil et al., 2023; Deng et al., 2021). Dalam konteks perkotaan, teknologi ini memungkinkan simulasi dan analisis mendalam terhadap berbagai komponen kota – mulai dari infrastruktur, lingkungan, hingga aktivitas manusia – sehingga dapat mendukung perencanaan, pengambilan keputusan, dan pengelolaan kota secara lebih efisien dan berkelanjutan (Al-Sehrawy et al., 2021; Ye et al., 2023). Berbagai penerapan Digital Twin di kota-kota maju telah menunjukkan manfaatnya, misalnya untuk memperoleh umpan balik warga (White et al., 2021) dan memodelkan sistem transportasi perkotaan secara real-time (Yeon et al., 2023). Hal ini mendorong banyak pemerintah kota mengadopsi inisiatif Digital Twin sebagai bagian dari agenda smart city mereka (Bigorra et al., 2022). Meskipun demikian, adopsi Digital Twin di tingkat kota masih menghadapi berbagai tantangan teknis maupun non-teknis, terutama terkait integrasi data yang masif dan heterogen serta koordinasi lintas sistem (Jeddoub et al., 2023).

Di sisi lain, data spasial konvensional yang umum digunakan dalam perencanaan dan manajemen perkotaan, seperti peta dua dimensi dan GIS tradisional, memiliki keterbatasan dalam

merepresentasikan kondisi nyata di lapangan yang kompleks dan berdimensi tiga. Pendekatan 2D tidak mampu menggambarkan informasi vertikal maupun detail bentuk bangunan dan ruang kota secara utuh, sehingga potensi pemanfaatannya untuk analisis perkotaan yang mendalam menjadi terbatas (Paasch & Paulsson, 2023). Untuk menjawab kebutuhan tersebut, perkembangan teknologi pemodelan 3D perkotaan semakin pesat dalam beberapa tahun terakhir. Pemodelan kota dalam bentuk tiga dimensi terbukti sangat berguna dalam berbagai aplikasi perkotaan, seperti perencanaan tata ruang, pengelolaan aset infrastruktur, visualisasi lanskap kota, hingga perencanaan kebencanaan (Shariatpour & Behzadfar, 2022). Selain itu, konsep kadaster 3D mulai diakui penting untuk mengelola informasi pertanahan yang kompleks di lingkungan perkotaan bertingkat, karena sistem kadaster konvensional sering kali sulit menangani hak atas ruang di atas maupun bawah permukaan tanah (Paasch & Paulsson, 2023). Hal ini menegaskan perlunya integrasi data spasial 3D yang lebih kaya dan aktual dalam platform pengelolaan kota cerdas.

Metode fotogrametri miring (*oblique photogrammetry*) hadir sebagai solusi inovatif untuk memperoleh data spasial 3D perkotaan yang detail dan akurat. Berbeda dengan citra udara vertikal, fotogrametri miring memanfaatkan foto pada sudut kemiringan tertentu sehingga mampu merekam sisi fasad bangunan dan objek perkotaan lainnya secara lebih lengkap. Dengan kemajuan pesat dalam wahana *unmanned aerial vehicle* (UAV) dan teknik *Structure from Motion* (SfM), fotogrametri miring telah merevolusi pemetaan 3D kota karena dapat menangkap data geometrik berpresisi tinggi sekaligus tekstur visual berkualitas tinggi dalam waktu relatif singkat (Xu et al., 2024; Zhou et al., 2021). Studi menunjukkan bahwa pemotretan *oblique* menggunakan UAV mampu mencakup area luas dengan efisiensi tinggi dan memenuhi standar akurasi pemetaan skala besar. Model 3D realitas kota yang dihasilkan dari fotogrametri miring beresolusi tinggi ini dapat dimanfaatkan sebagai basis *Digital Twin* perkotaan yang lebih representatif. Melalui integrasi dengan data sensor *Internet of Things* (IoT) secara *real-time*, model 3D tersebut dapat diperbarui dan mencerminkan kondisi aktual di lapangan, misalnya untuk memantau perubahan lingkungan atau infrastruktur secara berkala (La Guardia, 2023). Selain itu, teknologi WebGIS 3D modern (seperti platform CesiumJS) memungkinkan model 3D hasil fotogrametri dipublikasi dan diakses melalui web secara interaktif. Dengan memanfaatkan format optimasi seperti 3D Tiles, model kota berukuran besar dapat ditampilkan di browser dengan kinerja yang baik (Zhan et al., 2021). Artinya, pengambil kebijakan dan masyarakat dapat berinteraksi langsung dengan *Digital Twin* kota dalam lingkungan web, mengamati simulasi maupun informasi spasial 3D secara intuitif (Lam et al., 2024). Integrasi antara fotogrametri miring dan WebGIS berbasis 3D ini berpotensi menjembatani kesenjangan antara data spasial tradisional yang statis dengan kebutuhan visualisasi kota cerdas yang dinamis.

Meskipun teknologi *Digital Twin* dan fotogrametri 3D telah berkembang di berbagai negara maju, kajian mengenai integrasi keduanya di negara berkembang seperti Indonesia masih sangat terbatas. Sebagian besar proyek *Digital Twin* perkotaan yang telah dilaporkan fokus pada integrasi BIM, sensor IoT, dan big data di kota-kota dengan infrastruktur teknologi maju (Cureton & Hartley, 2023; Rantanen et al., 2023). Sementara itu, pemanfaatan data fotogrametri udara resolusi tinggi untuk membangun *Digital Twin* kota jarang ditemukan dalam literatur, terlebih di konteks negara berkembang. Keterbatasan sumber daya, infrastruktur data, dan keahlian teknis menjadi tantangan tersendiri dalam penerapan *Digital Twin* di negara seperti Indonesia (Shariatpour & Behzadfar, 2022). Akibatnya, upaya transformasi dari sistem informasi geospasial konvensional menuju platform *Digital Twin* berbasis 3D berjalan lambat dan sporadis. Hingga kini, implementasi *Digital Twin* perkotaan di Indonesia umumnya masih pada tahap prototipe atau proyek percontohan skala terbatas, misalnya untuk sebagian kawasan kota saja, dan belum terintegrasi penuh dengan data fotogrametri atau kadaster 3D yang komprehensif. Gap penelitian ini terletak pada kurangnya studi yang menggabungkan model 3D hasil *oblique photogrammetry* dengan kerangka *Digital Twin* perkotaan yang dapat diakses luas melalui WebGIS. Oleh karena itu, penelitian ini diusulkan untuk mengisi kekosongan tersebut dengan mengintegrasikan *Digital Twin* berbasis WebGIS dan fotogrametri miring 3D, yang diharapkan dapat meningkatkan kualitas data

spasial perkotaan dan mendukung inisiatif smart city serta pengembangan kadaster 3D di Indonesia. Upaya ini tidak hanya akan menyajikan pemodelan 3D kota yang lebih realistis dan up-to-date, tetapi juga memperkuat landasan bagi pengambilan keputusan yang berdasar pada informasi spasial 3D terintegrasi secara digital.

METODE

Penelitian ini dilakukan di Kecamatan Klojen, Kota Malang, dengan fokus pada Mall Olympic Garden (MOG) dan Stadion Gajayana. Kedua lokasi dipilih karena memiliki struktur bangunan kompleks serta nilai sosial-ekonomi penting bagi masyarakat. MOG sebagai salah satu pusat perbelanjaan terbesar dan Stadion Gajayana sebagai fasilitas olahraga ikonik menjadikannya area ideal untuk studi Digital Twin. Model digital dari kedua bangunan ini diharapkan menunjukkan keandalan teknologi oblique photogrammetry dalam menangkap detail bangunan dan infrastruktur.



Gambar 1. Lokasi studi kasus

Data yang digunakan dalam penelitian ini mencakup beberapa jenis data geospasial sebagai berikut:

Tabel 1. Sumber Data

No	Jenis Data	Sumber	Keterangan
1	Data Citra Oblique 3D	Trinity Pro Drone dengan Kamera D2M (Gambar 2)	Akuisisi dengan sudut nadir oblique 45 derajat
2	Data GNSS	Stonex S800	Akuisisi data posisi untuk georeferensi dan uji akurasi
3	CCTV Kota Malang	Kemenhub Kota Malang	Pemantauan secara real time

Tabel 2 menyajikan data dari dua penerbangan (Flight 1 dan Flight 2) yang menggunakan teknologi oblique photogrammetry. Setiap penerbangan menghasilkan lima folder ('A', 'D', 'S', 'W', dan 'X') yang memuat jumlah gambar per folder, ukuran data dalam gigabyte, dan total gambar seluruh penerbangan. Pada Flight 1, setiap folder berisi 882 gambar sehingga total keseluruhan adalah 4.410 gambar. Ukuran data per folder berkisar antara 5,05 sampai 5,39 GB, dan total

keseluruhan file menyentuh sekitar 26,16 GB. Pada Flight 2, setiap folder memiliki 755 gambar, total 3.775 gambar, dengan ukuran data per folder 4,32 sampai 4,88 GB dan total keseluruhan sekitar 22,02 GB.

Tabel 2. Data Flight pertama

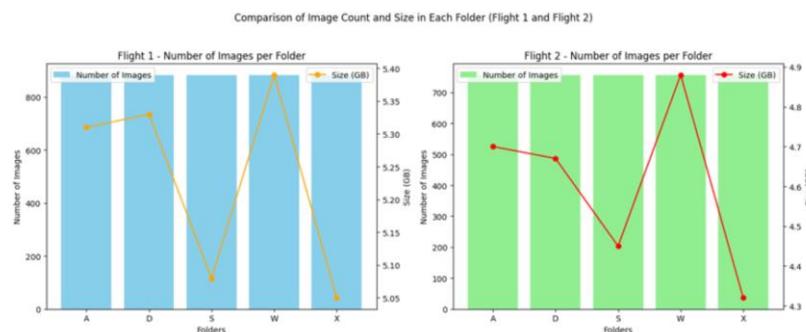
Flight 1			
Nama Folder	Images	Size	Total Image
A	882	5,31 GB	4410
D	882	5,33 GB	
S	882	5,08 GB	
W	882	5,39 GB	
X	882	5,05 GB	

Pada penerbangan kedua, setiap folder berisi 755 gambar dengan total 3.775 gambar. Ukuran data per folder berkisar 4,32–4,88 GB, dengan total sekitar 22,02 GB (Tabel 3).

Tabel 3. Data Flight kedua

Flight 2			
Nama Folder	Images	Size	Total Image
A	755	4,70 GB	3775
D	755	4,67 GB	
S	755	4,45 GB	
W	755	4,88 GB	
X	755	4,32 GB	

Gambar 2 memperlihatkan bahwa meskipun jumlah gambar antar folder dalam satu penerbangan sama, ukuran file antar folder berbeda. Variasi ini menunjukkan bahwa detail visual dalam citra memengaruhi ukuran file. Faktor seperti variasi tekstur objek, bayangan, kondisi pencahayaan, dan resolusi kamera dapat meningkatkan kompleksitas citra sehingga memperbesar ukuran file. Literatur menunjukkan bahwa pemilihan format gambar dan tingkat kompresi mempengaruhi baik ukuran data maupun akurasi model. Sebagai contoh, studi oleh Alfio et al. (2020) menemukan bahwa pilihan format TIFF versus JPEG dan tingkat kompresi JPEG sangat berpengaruh pada kualitas ortofoto dan point cloud dalam pemetaan UAV. Variasi dalam kualitas citra mengakibatkan perbedaan waktu pemrosesan signifikan terutama pada tahap pembuatan dense point cloud.



Gambar 2. Perbandingan jumlah foto dan ukuran setiap folder pada Flight 1 (kiri) dan Flight 2 (kanan)

Perbandingan antara Flight 1 dan Flight 2 juga memberikan wawasan bahwa penerbangan dengan kondisi visual yang lebih kompleks atau detail objek yang lebih kaya akan menghasilkan ukuran data yang lebih besar, meskipun jumlah gambar serupa. Oleh karena itu manajemen data menjadi penting untuk efisiensi: penyimpanan, bandwidth untuk transfer data, dan waktu pemrosesan. Strategi seperti pemilihan format citra yang optimal, kompresi yang mempertahankan

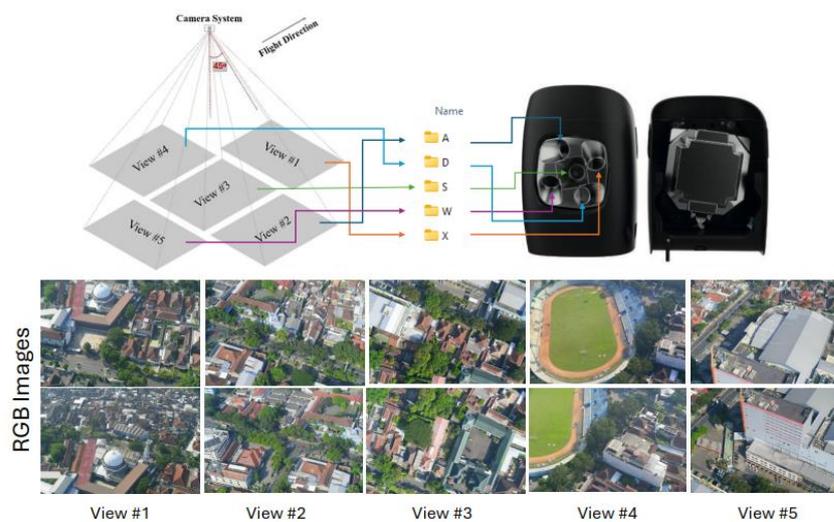
kualitas, serta struktur penyimpanan data yang baik dapat membantu mengurangi beban teknis tanpa mengorbankan akurasi model.

Metodologi penelitian diawali dengan akuisisi data 3D menggunakan teknologi Oblique 3D Photogrammetry melalui drone Trinity Pro yang dilengkapi konfigurasi 4 kamera oblique dan 1 kamera nadir. Kombinasi sudut pengambilan ini memungkinkan detail objek terekam lebih akurat. Data hasil akuisisi kemudian dikoreksi dengan observasi GNSS dan metode Radial Static untuk menjamin ketelitian posisi geografis. Sebanyak 12 titik GCP digunakan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Distribusi titik GCP pada AOI

Gambar 4. menunjukkan sistem kamera pada pemetaan fotogrametri oblique yang menangkap citra dari berbagai sudut pandang. Kamera dipasang pada drone Trinity Pro dengan konfigurasi nadir (tegak lurus) dan oblique (miring $\pm 45^\circ$), sehingga memberikan visual area yang lebih komprehensif. Akuisisi dilakukan pada ketinggian 200 m dengan overlap 70% (sidelap) dan 80% (frontlap). Hasil tangkapan tiap kamera disimpan dalam folder terpisah ('A,' 'D,' 'S,' 'W,' dan 'X') sesuai sudut pengambilan gambar. Setiap folder memuat foto dengan perspektif berbeda dari area yang sama, misalnya folder 'A' dari sisi kiri dan 'D' dari sisi kanan. Pendekatan ini membuat data lebih terstruktur sehingga memudahkan pengelolaan serta pemrosesan dalam pemetaan dan rekonstruksi 3D.



Gambar 4. Hasil akuisisi mendapatkan 5 foto dengan view yang berbeda dalam sekali pemotretan setiap titik stasiun

Foto yang dihasilkan menampilkan berbagai perspektif area yang sama, termasuk bangunan, jalan, dan stadion. Pendekatan multi-sudut ini penting untuk menghasilkan model 3D yang akurat dan detail. Metode oblique photogrammetry unggul dalam menangkap elemen vertikal seperti dinding bangunan dan infrastruktur lain yang sulit terlihat pada citra nadir, sehingga setiap sisi objek dapat terwakili lebih menyeluruh. Dalam proses pemetaan, data dari berbagai sudut pandang digabungkan melalui rekonstruksi fotogrametri untuk menghitung posisi, bentuk, dan dimensi objek di lapangan. Hasilnya berupa model 3D yang dapat dimanfaatkan untuk analisis tata ruang kota, pemantauan infrastruktur, hingga peta tematik untuk perencanaan. Teknik ini memberikan informasi visual yang lebih kaya, sehingga pemangku kepentingan dapat melihat area secara detail—terutama pada lingkungan perkotaan yang kompleks, di mana fasad bangunan, jalan, dan infrastruktur lain menjadi elemen penting bagi analisis spasial yang presisi.

Data yang diperoleh kemudian diproses melalui beberapa tahapan untuk menghasilkan model Digital Twin. Tahap awal adalah pembuatan 3D Model Tiles untuk visualisasi interaktif berbasis web. Selanjutnya, data point cloud diproses guna merepresentasikan detail struktur objek, diikuti pembuatan model elevasi digital (DEM) untuk menambahkan dimensi topografi, serta ortofoto sebagai representasi visual realistis. Rangkaian pengolahan ini memastikan kualitas dan kelengkapan data yang mendukung analisis lebih lanjut. Tahap berikutnya adalah pemodelan dan penerbitan data dalam format yang mendukung visualisasi web. Model 3D dikonversi ke format BIM (IFC) atau CityGML, lalu diterbitkan sebagai *3D Tiles* melalui CesiumJS dan Geoserver. Publikasi dalam format ini memungkinkan visualisasi 3D yang dinamis, interaktif, dan akurat pada lingkungan web, sehingga data lebih mudah diakses dan dimanfaatkan oleh berbagai pihak. Integrasi ini memastikan model *Digital Twin* dapat diakses secara online dan diinteraksikan dalam beragam aplikasi. Tahap terakhir metodologi adalah integrasi sensor CCTV dan publikasi model Digital Twin ke sistem berbasis web melalui GitHub Pages dan Unity. Publikasi ini memungkinkan penerapan dalam berbagai skenario, seperti pelestarian warisan budaya, pemetaan kadaster 3D, dan pengembangan Smart City. Dengan memanfaatkan teknologi 3D WebGIS pada platform CesiumJS, data dapat diakses dan divisualisasikan secara online untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis data. Integrasi ini menyediakan solusi praktis bagi pemantauan, perencanaan, dan pengelolaan perkotaan secara real-time.

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

Di mana x_i merupakan data foto, x_j merupakan data pengamatan, dan n adalah jumlah data pengamatan. Selanjutnya, analisis data ortofoto dan DEM dilakukan dengan mengacu pada ketelitian geometri sesuai Peraturan BIG Nomor 15 Tahun 2014, seperti berikut:

$$CE90 = 1,5175 \times RMSE_r \quad (2)$$

$$LE90 = 1,6499 \times RMSE_z \quad (3)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

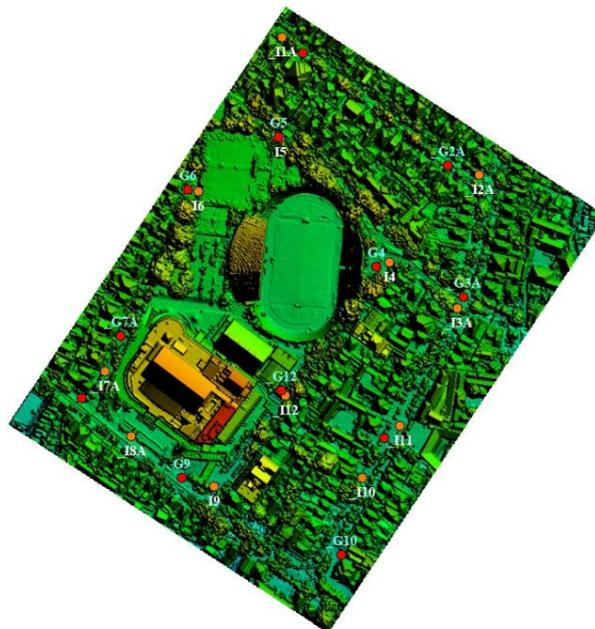
1. Hasil Koreksi Orthophoto dan DEM

Gambar 6. memperlihatkan hasil orthophoto dengan Ground Sampling Distance (GSD) sebesar 2,2 cm, yang berarti setiap piksel mewakili jarak 2,2 cm di lapangan. Dengan resolusi tinggi ini, detail lingkungan sekitar Stadion Gajayana dan Mall Olympic Garden (MOG), Malang, dapat ditangkap dengan jelas. Objek penting seperti bangunan, jalan, serta titik pengukuran dapat diidentifikasi secara akurat. Sebanyak 12 titik kontrol dan 12 titik uji (ICP) dengan kode unik (misalnya G5, I5) ditempatkan di sekitar area stadion dan mall untuk mendukung analisis spasial lebih lanjut.



Tabel 5. Elevasi dari ICP dan DEM

Nama Titik	Z (Koordinat ICP)	Z (Koordinat DEM)	(DZ) ²
1	455.840	455.895	0.0030
2	451.714	452.062	0.1211
3	451.437	451.382	0.0030
4	452.295	452.274	0.0004
5	454.647	454.556	0.0083
6	454.364	453.919	0.1984
7	452.512	451.022	2.2213
8	451.346	450.951	0.1563
9	449.969	450.134	0.0272
10	450.213	451.254	0.0016
11	450.694	451.000	0.0936
12	454.816	451.195	0.1414



memiliki akurasi tinggi, dengan perbedaan sangat kecil dari data lapangan, sehingga dapat diandalkan untuk pemetaan dan perencanaan spasial detail.

Nama	3D Model (m)	DOKUMENTASI	JARAK ASLI (LAPANGAN) (m)	DOKUMENTASI	SELISIH (m)
D1	0,406		0,400		0,006
D2	0,783		0,784		-0,001
D3	0,601		0,600		0,001
***	***	***	***	***	***
D28	0,639		0,646		-0,007
D29	1,001		1,000		0,001
D30	0,505		0,507		-0,002

Gambar 8. Koreksi model 3D Tiles

3. Hasil Koneksi CCTV dengan 3D Tiles

Model 3D tiles yang dikoreksi dengan akurasi tinggi kini terintegrasi dengan data real-time CCTV, sehingga tidak hanya menampilkan visualisasi statis tetapi juga pemantauan langsung kondisi kota. Integrasi ini mendukung pengambilan keputusan cepat dan informatif untuk manajemen kota, pemantauan keamanan, hingga analisis lalu lintas. Dengan perpaduan 3D tiles presisi dan CCTV live streaming, Kota Malang dapat mengoptimalkan penerapan smart city, seperti pemantauan kepadatan lalu lintas, deteksi area rawan kriminalitas, serta penanganan darurat secara lebih efektif.



Gambar 9. Integrasi CCTV dengan 3D Tiles

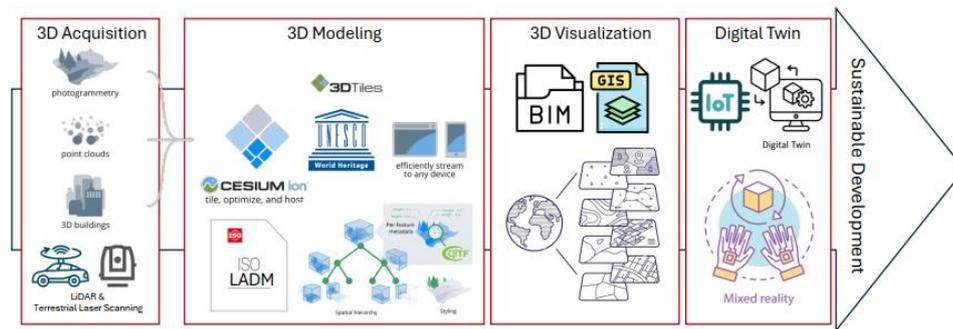
Integrasi CCTV dengan model 3D tiles dalam smart city, seperti Kota Malang, menghadapi sejumlah tantangan. Kendala teknis meliputi keterbatasan bandwidth dan latensi jaringan, sinkronisasi data real-time, serta kualitas visual CCTV yang dipengaruhi resolusi dan pencahayaan. Dari sisi keamanan, isu privasi data menjadi penting untuk mencegah akses ilegal. Selain itu, integrasi berbagai merek kamera dalam satu platform, kebutuhan komputasi tinggi untuk pemrosesan dan penyimpanan data besar, serta biaya pemeliharaan infrastruktur juga menjadi hambatan utama. Mengatasinya memerlukan perencanaan matang, investasi teknologi, dan kebijakan pendukung agar sistem dapat berfungsi optimal.

4. Future Work

Penelitian ke depan tentang Digital Twin diarahkan pada pengembangan model yang lebih akurat dan integratif untuk mendukung pembangunan berkelanjutan. Fokus utama mencakup peningkatan kualitas akuisisi data 3D dengan UAV, LIDAR, dan fotogrametri oblique, serta otomatisasi algoritma pemrosesan untuk efisiensi dan cakupan area yang luas. Integrasi dengan IoT akan memperkuat pemantauan real-time terhadap infrastruktur, kualitas udara, dan lalu lintas, sekaligus memungkinkan simulasi skenario pembangunan.

Penggunaan Mixed Reality dan Augmented Reality akan menghadirkan visualisasi imersif, mendukung keterlibatan masyarakat dalam perencanaan kota secara partisipatif dan transparan. Selain itu, interoperabilitas antarplatform dan standar data perlu dikembangkan agar Digital Twin dapat diterapkan lintas sektor, seperti tata ruang, sumber daya alam, dan mitigasi bencana. Dengan

pengembangan berkelanjutan, Digital Twin diharapkan menjadi instrumen kunci dalam mewujudkan kota cerdas dan berkelanjutan.



Gambar 10. Penelitian masa depan

Pembahasan

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pemanfaatan oblique photogrammetry dengan drone Trinity Pro untuk membangun Digital Twin kawasan perkotaan Kota Malang, khususnya di sekitar Stadion Gajayana dan Mall Olympic Garden (MOG). Integrasi data spasial 3D dengan CCTV menunjukkan bagaimana teknologi fotogrametri, pemodelan 3D, dan Internet of Things (IoT) dapat mendukung implementasi smart city. Kontribusi utama penelitian ini adalah membuktikan bahwa oblique photogrammetry mampu menghasilkan data dengan tingkat akurasi tinggi, sekaligus memperlihatkan potensi integrasi Digital Twin dengan data real-time di konteks negara berkembang.

Hasil orthophoto dengan GSD 2,2 cm menunjukkan detail lingkungan yang sangat jelas. Nilai CE90 horizontal 0,047 m dan LE90 vertikal 0,822 m sesuai standar BIG kelas 1, sehingga layak untuk pemetaan detail. Temuan ini sejalan dengan Mavrokapnidis et al. (2021) yang menekankan kemampuan oblique photogrammetry menangkap elemen vertikal seperti fasad bangunan, serta Xu et al. (2024) yang membuktikan peningkatan kualitas model melalui kombinasi UAV dan GCP. Demikian pula, Zhou et al. (2021) melaporkan bahwa metode ini efektif memenuhi kebutuhan pemetaan perkotaan berskala besar.

Model DEM dengan GSD 8,8 cm memiliki RMSE 0,4979 m, masih dalam rentang akurasi yang dapat diandalkan untuk representasi topografi. Hasil ini konsisten dengan studi Grohmann et al. (2019) yang melaporkan RMSE <0,5 m pada pemetaan UAV di area terbuka, memperkuat relevansi pendekatan ini untuk kondisi urban padat.

Model 3D Tiles yang dihasilkan melalui rekonstruksi fotogrametri memperlihatkan RMSE hanya 0,0118 m dari 30 titik uji, menegaskan kesesuaian digital representation dengan kondisi lapangan. Hasil ini serupa dengan Zhan et al. (2021) yang menekankan bahwa format 3D Tiles mampu mempertahankan akurasi sekaligus efisiensi visualisasi data besar dalam platform berbasis web.

Penerbitan data dalam format 3D Tiles melalui CesiumJS dan Geoserver memungkinkan visualisasi interaktif yang dapat diakses luas. Hal ini selaras dengan Lam et al. (2024) yang berhasil mengintegrasikan IFC dan CityGML untuk meningkatkan interoperabilitas model kota cerdas. Temuan ini juga konsisten dengan laporan Naserentin et al. (2022) yang menekankan pentingnya kombinasi platform terbuka dan komersial dalam mendukung keterbukaan data kota. Dengan demikian, penelitian ini memperkuat argumen bahwa WebGIS 3D bukan hanya sarana visualisasi, tetapi juga medium kolaborasi dan transparansi publik.

Integrasi CCTV dengan 3D Tiles memperluas fungsi Digital Twin dari sekadar visualisasi statis menjadi pemantauan real-time. Aplikasi ini mendukung pengelolaan lalu lintas, keamanan, dan keadaan darurat. Temuan ini sejalan dengan Peldon et al. (2024) yang menegaskan pentingnya data real-time dalam manajemen kota, serta Jeddoub et al. (2023) yang menggarisbawahi tantangan integrasi sensor heterogen dalam Digital Twin. Dengan demikian, penelitian ini membuktikan bahwa integrasi multi-sumber data dapat meningkatkan ketangguhan kota terhadap dinamika lapangan.

Meskipun hasil penelitian menunjukkan potensi besar, sejumlah tantangan masih harus diatasi. Integrasi CCTV menuntut bandwidth tinggi, latensi rendah, serta dukungan cloud computing yang kuat, sebagaimana diidentifikasi juga oleh Weil et al. (2023) dalam kajian tantangan Digital Twin kota. Isu keamanan dan privasi data publik menjadi krusial, sejalan dengan White et al. (2021) yang menyoroti pentingnya tata kelola data dalam citizen-centric digital twin. Selain itu, variasi ukuran data antar folder meskipun jumlah citra sama memperlihatkan bahwa manajemen data fotogrametri perlu memperhitungkan kompleksitas lingkungan dan kondisi penerbangan, sebagaimana disinggung oleh Shariatpour & Behzadfar (2022) terkait keterbatasan teknis pengolahan data spasial skala besar.

Implikasi dari penelitian ini cukup luas. Pertama, hasilnya mendukung penerapan One Map Policy dengan menyediakan basis data 3D yang akurat lintas sektor, sejalan dengan upaya nasional integrasi data spasial (Pakpahan et al., 2019). Kedua, integrasi data real-time menegaskan peran Digital Twin sebagai alat manajemen kota dinamis yang berorientasi pada respons cepat. Ketiga, akses data berbasis web mendorong keterlibatan publik dan transparansi dalam pengambilan keputusan, sebagaimana juga dicatat oleh Cureton & Hartley (2023).

Meski demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan. Studi kasus masih terbatas pada dua lokasi utama, sehingga generalisasi ke seluruh Kota Malang memerlukan kajian lebih luas. Faktor eksternal seperti cuaca dan pencahayaan juga memengaruhi kualitas citra. Integrasi CCTV masih tahap awal, belum mencakup keragaman perangkat maupun kompleksitas jaringan sensor perkotaan. Untuk penelitian selanjutnya, peningkatan akuisisi data dapat dilakukan dengan UAV berteknologi LiDAR untuk memperkaya model 3D, serta integrasi IoT yang lebih luas mencakup data kualitas udara, iklim, dan mobilitas. Algoritma otomatisasi pemrosesan data skala besar juga penting, sebagaimana didorong oleh Rantanen et al. (2023). Selain itu, pemanfaatan Augmented Reality dan Mixed Reality (Martella et al., 2023) dapat meningkatkan interaktivitas serta partisipasi publik. Tidak kalah penting, aspek hukum dan etika privasi data perlu dikaji mendalam agar integrasi CCTV dan sensor real-time tidak menimbulkan persoalan sosial.

Dengan mempertimbangkan temuan, keterbatasan, serta prospek pengembangan, penelitian ini menegaskan bahwa oblique photogrammetry merupakan metode andal untuk membangun Digital Twin perkotaan dengan akurasi tinggi. Integrasi CCTV menambah dimensi dinamis dalam manajemen kota, menjadikan Digital Twin bukan hanya sebagai representasi visual, tetapi juga instrumen pengelolaan perkotaan adaptif. Melalui pengembangan lebih lanjut, Digital Twin berpotensi menjadi instrumen utama tata kelola kota cerdas, adaptif, dan berkelanjutan di Indonesia, sekaligus mengisi celah penelitian yang masih jarang dilakukan di negara berkembang.

KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa teknologi oblique photogrammetry mampu menghasilkan pemetaan dan pemodelan 3D dengan akurasi tinggi. Koreksi orthophoto (GSD 2,2 cm) dan DEM (GSD 8,8 cm) memberikan detail yang memadai untuk identifikasi objek penting, dengan uji titik kontrol menunjukkan ketelitian kelas 1 sesuai standar BIG ($CE_{90} = 0,047$ m; $LE_{90} = 0,822$ m). Model 3D tiles juga terbukti andal dengan nilai RMSE 0,0118 m. Integrasi CCTV live streaming dengan model 3D tiles menambah fungsi pemantauan real-time, mendukung pengambilan keputusan kota secara lebih responsif. Namun, implementasi masih menghadapi tantangan pada kebutuhan bandwidth, keamanan data, sinkronisasi, serta infrastruktur komputasi.

Ke depan, penelitian diarahkan pada peningkatan akuisisi data 3D (UAV, LIDAR, fotogrametri oblique), integrasi dengan IoT untuk data dinamis, serta penerapan Mixed Reality guna meningkatkan partisipasi masyarakat dalam perencanaan kota yang cerdas dan berkelanjutan..

PERNYATAAN KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dalam artikel ini (The authors declare no competing interest).



REFERENSI

- Al-Sehrawy, R., Kumar, B., & Watson, R. (2021). A digital twin uses classification system for urban planning & city infrastructure management. *Journal of Information Technology in Construction*, 26, 832–862.
- Badan Informasi Geospasial. (2014). Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar. <https://peraturan.bpk.go.id/Details/269446>
- Bigorra, J. F., Casals, M., & Gangolells, M. (2022). The adoption of urban digital twins. *Cities*, 131, 103905.
- Cureton, P., & Hartley, E. (2023). City information models (CIMs) as precursors for urban digital twins (UDTs): A case study of Lancaster. *Frontiers in Built Environment*, 9, 1048510.
- Deng, T., Zhang, K., & Shen, Z. (2021). A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities. *Journal of Management Science and Engineering*, 6, 125–134.
- Jeddoub, I., Nys, G.-A., Hajji, R., & Billen, R. (2023). Digital twins for cities: Analyzing the gap between concepts and current implementations with a specific focus on data integration. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 122, 103440.
- La Guardia, M. (2023). 3D urban digital twinning on the web with low-cost technology: 3D geospatial data and IoT integration for wellness monitoring. *Big Data and Cognitive Computing*, 9(4), 107.
- Lam, P.-D., Gu, B.-H., Lam, H.-K., Ok, S.-Y., & Lee, S.-H. (2024). Digital twin smart city: Integrating IFC and CityGML with semantic graph for advanced 3D city model visualization. *Sensors*, 24(12), 3761.
- Grohmann, C. H., Garcia, G. P. B., Affonso, A. A., & Albuquerque, R. W. (2019). Aeolian dune modelling from airborne LiDAR, terrestrial LiDAR and Structure-from-Motion Multi-View Stereo. arXiv preprint arXiv:1910.06186. <https://arxiv.org/abs/1910.06186>
- Martella, A., Ramadan, A. I. H. A., Martella, C., Patano, M., & Longo, A. (2023). State of the art of urban digital twin platforms. In *Extended Reality (XR Salento 2023)* (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 14218, pp. 115–128). Springer, Cham.
- Mavrokapnidis, D., Mohammadi, N., & Taylor, J. E. (2021). Community dynamics in smart city digital twins: A computer vision–based approach for monitoring and forecasting collective urban hazard exposure. Proceedings of the 54th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), 1810–1818. <https://doi.org/10.24251/HICSS.2021.220>
- Naserentin, V., Somanath, S., Eleftheriou, O., & Logg, A. (2022). Combining open source and commercial tools in digital twin for cities generation. *IFAC-PapersOnLine*, 55(9), 185–189.
- Paasch, J. M., & Paulsson, J. (2023). Trends in 3D cadastre – A literature survey. *Land Use Policy*, 131, 106716.
- Pakpahan, F., Ramadani, T., Pradana, S. A., Supriyanto, M. A., & Mardiyono, E. (2019). Implementasi kebijakan satu peta energi sumber daya mineral (esdm one map) di kementerian energi sumber daya mineral republik Indonesia. *Matra Pembaruan: Jurnal Inovasi Kebijakan*, 3(2), 109–118.
- Peldon, D., Banihashemi, S., LeNguyen, K., & Derrible, S. (2024). Navigating urban complexity: The transformative role of digital twins in smart city development. *Sustainable Cities and Society*, 111, 105583. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105583>

- Rantanen, T., Julin, A., Virtanen, J.-P., Hyyppä, H., & Vaaja, M. T. (2023). Open geospatial data integration in game engine for urban digital twin applications. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(5), 310.
- Shariatpour, F., & Behzadfar, M. (2022). Digital twin: A step towards smart cities in urban planning, design and management. *Soffeh*, 32(2), 93–106.
- Weil, C., Bibri, S. E., Longchamp, R., Golay, F., & Alahi, A. (2023). Urban digital twin challenges: A systematic review and perspectives for sustainable smart cities. *Sustainable Cities and Society*, 99, 104862.
- White, G., Zink, A., Codecá, L., & Clarke, S. (2021). A digital twin smart city for citizen feedback. *Cities*, 110, 103064.
- Xu, J., Zhang, S., Jing, H., Hancock, C., Qiao, P., Shen, N., & Blay, K. B. (2024). Improving real-scene 3D model quality of unmanned aerial vehicle oblique-photogrammetry with a ground camera. *Remote Sensing*, 16(21), 3933.
- Ye, X., Du, J., Han, Y., Newman, G., Retchless, D., Zou, L., ... Cai, Z. (2023). Developing human-centered urban digital twins for community infrastructure resilience: A research agenda. *Journal of Planning Literature*, 38(2), 187–199.
- Yeon, H., Eom, T., Jang, K., & Yeo, J. (2023). DTUMOS, digital twin for large-scale urban mobility operating system. *Scientific Reports*, 13, 5154.
- Zhan, W., Chen, Y., & Chen, J. (2021). 3D Tiles-based high-efficiency visualization method for complex BIM models on the web. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(8), 476.
- Zhou, T., Lv, L., Liu, J., & Wan, J. (2021). Application of UAV oblique photography in real scene 3D modeling. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2021, 413–418.