

Perbandingan Visual Hasil Digitisasi 3D pada Pengarsipan Digital Artefak Warisan Budaya

Rendy Rayana dan Banung Grahita
 Institut Teknologi Bandung
e-mail: r.rayana.dkv@gmail.com

Abstrak—Sebagai salah satu wujud identitas bangsa yang kaya akan nilai budaya dan sejarah, artefak warisan budaya Indonesia perlu dijaga dan dipertahankan keberadaannya dari ancaman. Salah satu potensi yang dapat membahayakan keberadaan artefak adalah kerusakan yang dapat disebabkan oleh berbagai hal seperti pelapukan, bencana alam, dan penjarahan. Seiring dengan berkembangnya teknologi, untuk menghindari artefak dari berbagai ancaman berbahaya maka perlu dilakukan pengarsipan artefak secara digital atau disebut dengan digitisasi 3D. Sebagai salah satu tindakan preservasi warisan budaya, digitisasi 3D harus mempertimbangkan kesesuaian antara artefak asli dan digital, sehingga memerlukan hasil rekonstruksi yang akurat dengan teknologi yang efektif dan efisien. Penelitian ini dimaksudkan untuk membandingkan perbedaan visual hasil digitisasi 3D dari berbagai teknologi digitisasi yakni 3D scanner, kinect scanner, dan fotogrametri dengan tujuan untuk menemukan teknologi digitisasi 3D yang efektif dan efisien dalam pengarsipan digital artefak warisan budaya. Penelitian dilakukan secara deskriptif-komparatif yang diuraikan dengan prinsip kompleksitas dan kualitas pada digitisasi 3D. Hasil dalam penelitian ini dapat membantu peneliti, konservator, pegiat budaya, atau pengelola museum untuk mempertimbangkan teknologi yang digunakan dalam melakukan digitisasi dan pengarsipan digital 3D artefak warisan budaya Indonesia di masa yang akan datang.

Kata Kunci—Artefak, Digitisasi 3D, Perbandingan Visual, Pengarsipan Digital, Preservasi.

I. PENDAHULUAN

KEKAYAAN budaya Nusantara dapat dilihat dari warisan budayanya. Salah satu jenis warisan budaya yang kaya akan nilai-nilai seni, tradisi, dan kesejarahan adalah artefak warisan budaya. Artefak dikategorikan kedalam warisan budaya yang berwujud dan dapat dipindahkan (*movable tangible heritage*). Artefak merupakan karya leluhur bangsa sekaligus bukti peradaban sejarah yang terjadi di Indonesia yang mewariskan peristiwa sejarah bangsa, simbol-simbol bangsa, dan bukti keanekaragaman budaya bangsa Indonesia[1].

Terdapat berbagai ancaman terhadap artefak yang dapat membahayakan kondisi dan fisik asli artefak. Contohnya adalah kerusakan oleh faktor manusia maupun alam dan penjarahan. Banyak kasus penyelundupan artefak yang belakangan terjadi di Indonesia. Salah satunya adalah penyelundupan tiga buah patung arca jarahan candi yang ditemukan di New York, Amerika. Penyelundupan ini merupakan satu dari sekian banyak contoh ancaman yang membahayakan kondisi artefak warisan budaya di Indonesia dan menjadi urgensi terhadap artefak. Berdasarkan data konvensi UNESCO, seiring dengan berkembangnya zaman,

keberadaan warisan budaya semakin terancam dan memburuk yang diakibatkan oleh berbagai hal seperti industrialisasi, urbanisasi, perubahan iklim, pariwisata masal, perang, dan konflik [2]. Banyaknya ancaman yang dapat membahayakan artefak warisan budaya memerlukan adanya upaya berkelanjutan untuk menyelamatkan keberadaan artefak warisan budaya.

Preservasi secara sederhana adalah tindakan melestarikan warisan budaya dan benda-benda bersejarah. Berdasarkan Organisasi Pendidikan, Ilmu Pengetahuan dan Kebudayaan Perserikatan Bangsa-bangsa (UNESCO), kondisi asli objek harus dipertahankan tidak berubah. Pengawetan secara fisik dapat dilakukan dengan konservasi dan restorasi. Sedangkan pengetahuan dan informasi warisan budaya dapat dilestarikan secara digital. Oleh karena itu, preservasi warisan budaya penting untuk dilakukan mempertimbangkan empat alasan utama yaitu memori budaya, kedekatan kultural, keragaman lingkungan, dan ekonomi[3].

Dalam bidang preservasi warisan budaya, terdapat pengaplikasian teknologi untuk membantu menyimpan keberadaan artefak secara digital. Bentuk implementasi teknologi untuk membantu melestarikan warisan budaya secara digital disebut sebagai digitisasi. Digitisasi adalah proses perekaman dan konversi informasi fisik tiga dimensional menjadi digital menggunakan alat perekam atau pemindai seperti pemindai laser atau kamera. Proses digitisasi dalam preservasi warisan budaya membantu untuk mengarsipkan warisan budaya secara digital sekaligus menjaga data asli artefak dari kerusakan dan ancaman yang membahayakan objek fisik artefak[4].

Beberapa manfaat digitisasi 3D warisan budaya yang dapat membantu masyarakat, peneliti, atau pengelola museum untuk meningkatkan aksesibilitas terhadap artefak warisan budaya, di antaranya [5]:

A. *Data hasil pemindaian 3D dengan kualitas tinggi*

Data hasil pemindaian 3D dengan kualitas tinggi mendukung para arkeolog, peneliti, dan konservator dalam konservasi, pengarsipan, dan perlindungan warisan budaya.

B. *Data hasil pemindaian 3D dengan kualitas medium*

Data hasil pemindaian 3D dengan kualitas medium banyak digunakan dalam industri kreatif yang berkembang seperti: industri game, aplikasi, augmented reality, virtual reality, dan bidang pendidikan.

C. *Data hasil pemindaian 3D dengan kualitas rendah*

Data hasil pemindaian 3D dengan kualitas rendah atau tinggi dapat dipamerkan dan dipresentasikan melalui platform repositori online seperti Sketchfab,

Smithsonian3D, Potree, ScanTheWorld, Global Digital Heritage, CyArk, Nasa3D, dan lain sebagainya untuk untuk memfasilitasi dan mempermudah akses terhadap objek warisan budaya bagi pelajar, masyarakat, pelaku budaya, arkeolog, museolog, sejarawan, peneliti dan ahli multidisiplin lainnya.

D. data 3D dapat berfungsi sebagai catatan dan arsip koleksi nasional

Secara umum, data 3D dapat berfungsi sebagai catatan dan arsip koleksi nasional sebagai bentuk preservasi berkelanjutan warisan budaya.

Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan teknologi digitisasi 3D yang paling efektif dan efisien dengan cara membandingkan perbedaan visual hasil digitisasi tiga dimensi (yang selanjutnya disingkat 3D) antara teknologi 3D scanner, kinect scanner, dan fotogrametri. Ketiga teknologi tersebut digunakan pada sampel artefak warisan budaya yang sama dan pada kondisi lingkungan yang sama untuk menghasilkan artefak digital seakurat mungkin. Hasil digitisasi dibandingkan visualnya secara deskriptif komparatif yang dianalisis berdasarkan prinsip kompleksitas dan kualitas dalam metodologi digitisasi 3D warisan budaya oleh Pritchard dkk[6]. Parameter efektifitas dan efisiensi kemudian ditinjau berdasarkan kelebihan dan kekurangan kompleksitas proses, akurasi bentuk, tingkat detail, dan tekstur pada ketiga teknologi digitisasi.

Hasil dari penelitian ini dapat membantu peneliti, konservator, pegiat budaya, atau pengelola museum skala menengah kebawah untuk mempertimbangkan metode digitisasi dan pengarsipan digital yang digunakan untuk mengarsipkan artefak warisan budaya khususnya di Indonesia. Hasil dalam penelitian ini juga dapat menjadi salah satu referensi atau acuan bagi peneliti atau akademisi untuk melakukan digitisasi 3D pada objek warisan budaya.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini diawali dengan studi literatur terkait metodologi digitisasi 3D warisan budaya dan teknologi digitisasi yaitu laser scanner, kinect scanner, dan fotogrametri. Kemudian dilakukan proses digitisasi 3D menggunakan ketiga teknologi tersebut terhadap sebuah sampel artefak warisan budaya. Setelah proses digitisasi 3D selesai dilakukan pada artefak warisan budaya, dilakukan analisis perbandingan visual hasil ketiga teknologi digitisasi menggunakan metode deskriptif komparatif untuk menemukan teknologi yang paling efektif dan efisien. Tolak ukur efektif dan efisien dalam teknologi digitisasi diuraikan dengan prinsip kompleksitas dan kualitas dalam digitisasi 3D.

Berdasarkan metodologi digitisasi 3D oleh Pritchard dkk[6], dalam bukunya yang berjudul *Study On Quality In 3D Digitisation Of Cultural Heritage: Mapping Parameters, Formats, Standards, Benchmarks, Methodologies, and Guidelines* menyatakan bahwa kompleksitas dan kualitas adalah pertimbangan mendasar dalam menentukan upaya yang diperlukan untuk untuk mencapai nilai output yang diperlukan pada suatu proyek digitisasi 3D.

A. Kompleksitas

Kompleksitas berkaitan dengan aktivitas yang berjalan

dalam proses digitisasi baik itu dari dalam lingkup proyek atau diluar lingkup proyek yang dapat berdampak pada proses digitisasi seperti lingkungan, teknologi, lokasi, dan bahan. Kompleksitas dalam hal ini menentukan efisiensi. Kompleksitas adalah kebutuhan untuk merekonstruksi fisik warisan budaya tanpa mengurangi makna dan nilainya secara keseluruhan[6].

1) Kompleksitas Objek

Kompleksitas objek merupakan hubungan antara tingkat kualitas suatu objek dan tingkat kesulitan dalam memperoleh datanya. Dengan mengetahui kompleksitas objek, maka dapat membantu dalam menentukan teknologi dan peralatan yang lebih praktis untuk digunakan dalam proses digitisasi. Kompleksitas objek akan menimbulkan kendala baik pada teknologi maupun tujuan penggunaan akhir dari datanya. Misalnya, dalam hal transparansi permukaan, fotogrametri tidaklah efektif, sedangkan laser scanner dapat merambat melalui kaca atau permukaan tembus cahaya dari sebuah artefak. Kompleksitas dalam digitisasi menghubungkan persyaratan, kualitas, akurasi, keahlian yang tersedia, dan kelengkapan peralatan. Terdapat 3 aspek penting dalam kompleksitas objek untuk digitisasi 3D, yakni:

- a) Kompleksitas Struktural (Geometry) mengacu pada resolusi titik, tingkat detail, jumlah fitur, jumlah permukaan atau wajah dari objek atau struktur nyata.
- b) Kompleksitas Tekstur (Surface) Dalam konteks digitisasi 3D, kompleksitas tekstur atau permukaan berarti metrik kekasaran, vektor, kemiringan, atau variabilitas dalam titik normal map 3D.
- c) Kompleksitas Material mengacu pada kompleksitas objek yang berasal dari materi kimia dan fisik karakteristiknya misalnya reflectance, transmittance, absorbance, dll. Material dapat membatasi teknik dan metode pengambilan data aktif atau pasif terkait dengan kompleksitas dan kualitas akuisisi data 3D pada warisan budaya.

2) Kompleksitas Proses

Kompleksitas proses merupakan serangkaian peristiwa atau tindakan yang berkelanjutan yang mempengaruhi perubahan pada serangkaian tahapan. Kompleksitas proses yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah:

- a) Tujuan digitisasi, menjelaskan kepentingan setelah proses digitisasi selesai dilakukan.
- b) Jenis, menjelaskan jenis objek misalkan artefak museum, arsitektur, objek bawah laut, dsb.
- c) Lokasi, menjelaskan lokasi situs dan proses digitisasi.
- d) Dimensi, menjelaskan mengenai ukuran dan berat objek.
- e) Peralatan, menjelaskan mengenai alat utama dan peralatan lain yang diperlukan.
- f) Biaya, menjelaskan mengenai anggaran atau biaya peralatan.
- g) Durasi, menjelaskan mengenai waktu proses digitisasi.

B. Kualitas

Kualitas adalah pertimbangan mendasar dalam digitalisasi 3D warisan budaya. Kualitas dalam hal ini menentukan efektifitas. Seperti 'kompleksitas', istilah 'kualitas' digunakan tanpa definisi yang baku, dan ini menghadirkan tantangan yang signifikan karena warisan budaya berwujud sangat

beragam. Parameter kualitas digunakan pada berbagai tahap proses digitisasi 3D dan bervariasi tergantung pada jenis warisan budaya dan peralatan serta metodologi yang digunakan[6]. Parameter kualitas digitisasi sebagai berikut:

- a) Akurasi bentuk, menjelaskan mengenai kesesuaian bentuk berdasarkan siluet.
- b) Tingkat detail, menjelaskan mengenai detail dan geometri yang dihasilkan.
- c) Kualitas tekstur, menjelaskan mengenai tekstur yang diperoleh.

C. Efektifitas dan Efisiensi

Efektifitas dapat diukur dari kompleksitas objek dan kualitas hasil yang didapatkan, semakin baik hasil yang didapat maka semakin efektif pula teknologi yang digunakan. Adapun efisiensi dapat diukur dari kompleksitas proses dan kualitas yang memberikan hasil yang maksimal dengan usaha dan upaya yang paling minimal. Disimpulkan teknologi yang paling efektif dan efisien adalah teknologi yang dapat memberikan kualitas hasil yang terbaik secara visual dengan kompleksitas yang paling terjangkau dan mudah diakses [6].

D. Perencanaan

Digitisasi 3D warisan budaya terdiri dari tahapan-tahapan yang kompleks. Proses dokumentasi terhadap berbagai objek warisan budaya, kemampuan perangkat keras pemindaian, perangkat lunak pemrosesan, dan sistem visualisasi terus mengalami perkembangan. Perencanaan dalam proyek digitisasi harus berusaha untuk mengatasi perkembangan tersebut. Kendala proyek, peralatan yang tersedia, anggaran, dan durasi untuk melakukan digitisasi sangat penting untuk dipahami untuk menghasilkan luaran yang diharapkan. Pertimbangan perencanaan dalam hal ini dapat berupa stakeholder yang akan melakukan digitisasi, jenis objek yang akan dilakukan digitisasi, keadaan lingkungan, dan peralatan yang tersedia[6].

E. Metode Dokumentasi

Ada banyak teknologi yang tersedia untuk tujuan digitisasi dan tidak satu pun dapat dianggap usang atau ketinggalan zaman karena digitisasi dilakukan berdasarkan produk akhir yang diharapkan. Namun, perlu ditekankan bahwa hingga saat ini tidak ada metode baku atau kerangka kerja digitisasi secara umum untuk menentukan tingkat detail dan akurasi. Setiap objek warisan budaya didokumentasikan dan dilakukan digitisasi berdasarkan spesifikasi, keakuratan, dan anggaran yang disediakan atau disetujui oleh pemilik atau pemangku kepentingan [6].

1) Laser Scanner

Pemindai laser adalah sensor jarak aktif yang mampu menghasilkan titik padat untuk suatu objek dengan merekam informasi posisi (koordinat geometris: X, Y, Z). Pemindai laser biasanya digunakan di bidang dokumentasi warisan budaya, karena memungkinkan untuk mengukur objek alami atau buatan dengan skala yang berbeda-beda baik itu pecahan artefak atau monumen. Keuntungan menggunakan teknologi ini untuk pemindaian 3D adalah menangkap titik koordinat pemindaian dalam jumlah besar dengan waktu singkat, akurasi yang tinggi, dan kepadatan konsisten. Jenis-jenis laser scanner diantaranya adalah TLS (terrestrial laser scanner), ALS (airborne laser scanner), dan LIDAR (light

detection and ranging)[6].

2) Kinect scanner

Kinect scanner adalah alat sensor gerak yang diproduksi oleh Microsoft untuk menangkap informasi gerak kedalam bentuk digital. Kinect dapat digunakan sebagai 3D scanner dengan memanfaatkan teknologi sensor mid-range seperti pada 3D scanner. Teknologi ini dapat digunakan dengan memanfaatkan perangkat lunak dan sebuah computer untuk dapat digunakan sebagai pemindai. Keuntungan menggunakan Kinect adalah kecepatan dalam memindai bentuk secara keseluruhan dengan cara kerja yang hampir mirip dengan 3D scanner.

3) Fotogrametri

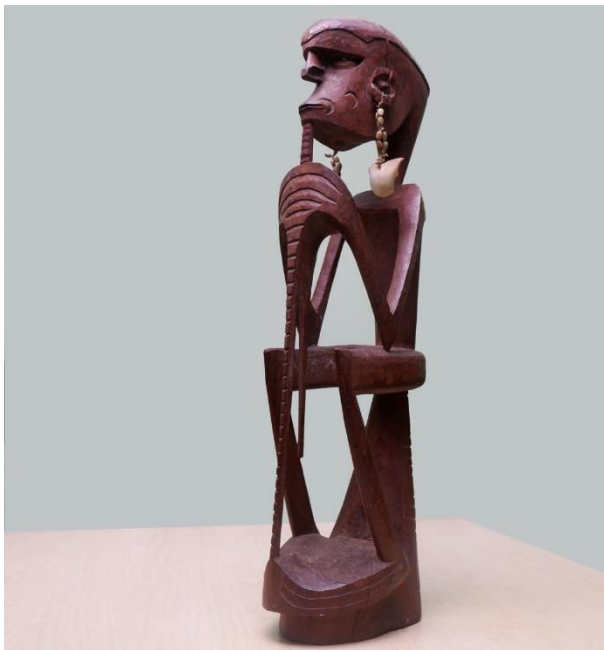
Fotogrametri adalah metode dokumentasi pasif atau berbasis gambar dengan merekam cahaya atau radiasi yang berasal dari sumber independen (misalnya, matahari atau pencahayaan buatan) dan dipantulkan dari objek yang direkam. Fotogrametri memproses gambar untuk mengekstrak informasi metrik objek tersebut. Khusus untuk digitisasi warisan budaya, akuisisi data menggunakan fotogrametri biasanya lebih disukai daripada metode lain karena efisien, tidak mengganggu, mudah, dan berbiaya rendah. Fotogrametri dilakukan dengan menggunakan kamera untuk mendapatkan data, kemudian data diolah dalam perangkat lunak untuk memproses rekonstruksi. Pada dasarnya, pemrosesan fotogrametri memperhitungkan data atau gambar yang tumpang tindih, semakin banyak data tumpang tindih hasil rekonstruksi akan semakin baik. Pencahayaan dan alat perekaman juga menentukan hasil dari fotogrametri. Rekonstruksi fotogrametri untuk kualitas tinggi memerlukan gambar tumpang tindih sekitar 85% dengan minimum data gambar berjumlah 80 foto (ukuran data meningkat berdasarkan ukuran objek dan tingkat detail yang diperlukan).

III. HASIL DAN DISKUSI

Untuk mengetahui metode dan teknis digitisasi yang efektif dan efisien bagi peneliti, konservator, pegiat budaya, dan pengelola museum dengan skala menengah kebawah di Indonesia yang akan mengarsipkan artefak warisan budaya, penelitian ini membandingkan hasil digitisasi 3D menggunakan 3 teknologi yaitu laser scanner, kinect scanner, dan fotogrametri, yang dibandingkan berdasarkan teori dan tinjauan pustaka metodologi 3D warisan budaya[6] yang membahas mengenai kompleksitas dan kualitas. Ketiga teknologi digitisasi tersebut dapat dimanfaatkan untuk mendokumentasikan benda warisan budaya di Indonesia. Penelitian ini dimaksudkan untuk mendapatkan perbandingan dan strategi serta teknologi terbaik untuk digitisasi benda warisan budaya di Indonesia. Berikut merupakan pembahasannya:

A. Perencanaan

Target sasaran dari penelitian ini adalah museum skala menengah kebawah yang membutuhkan metode digitisasi 3D yang terjangkau, akurat, dan mudah digunakan. Sampel yang digunakan dalam penelitian ini berupa artefak warisan budaya yang berbahan dasar dari kayu yang dipilih karena Indonesia merupakan negara yang secara geografis kaya akan vegetasi, sehingga banyak leluhur bangsa Indonesia yang membuat karya seni berbahan dasar kayu. Selain itu,



Gambar 1. Patung Laki Asmat.

Tabel 1.

Kompleksitas objek: struktural, tekstur, dan material

Kompleksitas Objek	Gambar	Keterangan
Kompleksitas Struktural		Objek memiliki bentuk yang rumit dan memerlukan geometri yang tinggi
Kompleksitas Tekstur		Terdapat beberapa ukiran dan corak yang perlu diperhatikan
Kompleksitas Material		Material berbahan dasar kayu

artefak dengan material kayu cenderung lebih mudah lapuk dibandingkan batu sehingga memerlukan perhatian lebih untuk mencegahnya dari kerusakan oleh pelapukan. Artefak studi kasus yang digunakan bernama Patung Laki Asmat yang merupakan karya seni pedalaman Asmat Utara yang bermaterial kayu dengan detail ukiran ukiran khas suku Asmat, dapat dilihat pada Gambar 1.

Lokasi pemindaian dilakukan di dalam ruangan atau studio dengan tambahan alat berupa lighting untuk meningkatkan kualitas dan hasil dokumentasi. Peralatan yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah laser scanner berupa 3D scanner hand-held, Kinect 360 scanner, dan fotogrametri berupa kamera mirrorless dengan peralatan tambahan lain yang dibutuhkan.

B. Metode Dokumentasi

1) Laser Scanner

Laser scanner yang digunakan dalam penelitian ini adalah portable hand-held laser scanner yang bernama Peel 2 3D scanner. Peel 2 ini dirilis pada tahun 2019 dan merupakan salah satu alat yang canggih dan paling mahal dalam penelitian ini. Peel 2 dapat digunakan dengan terhubung pada perangkat keras seperti PC atau laptop, dan terhubung pada perangkat lunak khusus yang bernama Peel. Peel 2 3D scanner sudah dapat digunakan untuk memindai objek warisan budaya setelah proses kalibrasi selesai.

Tabel 2.

Kompleksitas proses: tujuan, jenis, lokasi, dan dimensi

Kompleksitas Proses	Keterangan
Tujuan Digitisasi	Pengarsipan digital & preservasi
Jenis Objek Digitisasi	Artefak warisan budaya
Lokasi Digitisasi	Didalam ruangan (studio)
Dimensi Objek	10 x 16 x 54 cm
Kompleksitas Proses	Keterangan
Tujuan Digitisasi	Pengarsipan digital & preservasi
Jenis Objek Digitisasi	Artefak warisan budaya
Lokasi Digitisasi	Didalam ruangan (studio)
Dimensi Objek	10 x 16 x 54 cm

Tabel 3.

Kompleksitas proses: peralatan, biaya, dan durasi

Kompleksitas Proses	Laser Scanner	Kinect Scanner	Fotogrametri
Peralatan	Peel 2 Laptop	Kinect 360 Laptop	Kamera Lighting
Biaya	Estimasi 124 juta IDR	Estimasi 2 juta IDR	Estimasi 8 juta IDR
Durasi Pemindaian	3 – 4 jam	20 - 30 menit	30 - 45 menit

2) Kinect Scanner

Alat yang selanjutnya digunakan adalah Kinect 360 dari Xbox. Kinect 360 dirilis pada tahun 2010 dan merupakan alat yang paling terjangkau dalam penelitian ini. Kinect merupakan alat sensor gerak yang diproduksi oleh Microsoft. Kinect 360 memiliki mesin yang berupa RGB camera, depth sensor, dan mikrofon yang mampu mendeteksi gerakan tubuh, pengenalan wajah, dan mendeteksi suara. Sistem pemindai 3D yang disebut Light Coding pada Kinect ini menggunakan varian dari rekonstruksi 3D mirip seperti 3D scanner. Aplikasi yang digunakan untuk Kinect dalam penelitian ini adalah skanect.

3) Fotogrametri


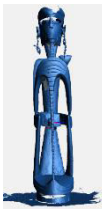






Alat yang selanjutnya digunakan adalah kamera mirrorless yang diproduksi oleh Fujifilm dengan kode XT100. Kamera ini digunakan untuk menangkap kumpulan gambar yang disebut datasets. Datasets diperoleh melalui serangkaian gambar tumpang tindih yang kemudian dapat diproses melalui perangkat keras seperti komputer dengan perangkat lunak khusus yang digunakan untuk merekonstruksi datasets menjadi objek 3D. Kamera dan fotogrametri merupakan opsi paling umum dan juga terjangkau bagi dokumentasi benda warisan budaya. Peneliti atau pelaku digitisasi dapat menggunakan kamera jenis DSLR ataupun mirrorless. Aplikasi atau perangkat lunak yang digunakan untuk fotogrametri adalah 3DF Zephyr.

C. Kompleksitas


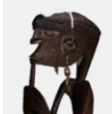

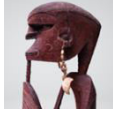

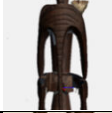

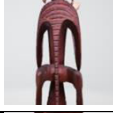




1) Kompleksitas Objek

Kompleksitas objek diawali dengan menganalisis detail dan bagian objek yang harus diperhatikan terutama corak permukaan, tekstur, dan bentuk. Kompleksitas struktural membahas mengenai detail bentuk dari artefak yang perlu dipindai. Kompleksitas tekstur membahas mengenai tekstur terpenting dari artefak yang perlu direkonstruksi. Kompleksitas material membahas mengenai bahan dasar artefak dan sifatnya terhadap cahaya, dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 4.
Perbandingan visual berdasarkan akurasi bentuk

Keterangan	Gambar	Laser Scanner	Kinect Scanner	Fotogrametri
Siluet dan detail bentuk tampak depan				
Siluet dan detail bentuk tampak samping				

Tabel 5.
Perbandingan visual berdasarkan akurasi bentingkat detail

Keterangan	Gambar	Laser Scanner	Kinect Scanner	Fotogrametri
Detail bagian kepala dan anting				
Detail dan corak tubuh bagian tengah				
Detail dan corak bagian belakang kaki				

2) *Kompleksitas Proses*

Kompleksitas proses diawali dengan menentukan tujuan digitisasi yaitu pengarsipan digital dan preservasi. Penentuan studi kasus atau objek digitisasi juga disebutkan dalam kompleksitas proses yaitu artefak warisan budaya. Lokasi digitisasi dalam penelitian ini dilakukan didalam ruangan dengan kondisi yang disesuaikan berdasarkan kebutuhan pencahayaan. Dimensi objek sampel artefak Patung Laki Asmat adalah 10cm panjang, 16cm lebar, dan 54cm tinggi, dapat dilihat pada Tabel 2.

Kompleksitas proses selanjutnya adalah berkaitan dengan peralatan kerja yang dibutuhkan ketika menggunakan alat pemindaian. 3D scanner Peel 2 memerlukan untuk terhubung pada perangkat lunak khusus dan komputer, dalam penelitian ini yang digunakan adalah laptop penulis. Kinect 360 juga memerlukan untuk terhubung pada perangkat lunak. Fotogrametri tidak memerlukan untuk terhubung pada komputer, tetapi memerlukan pencahayaan yang baik sehingga lighting menjadi peralatan esensial yang diperlukan, dapat dilihat pada Tabel 3.

Dari segi biaya, laser scanner menjadi alat yang paling mahal karena merupakan teknologi yang sedang berkembang, menyusul kamera untuk fotogrametri yang merupakan pilihan secara umum, dan Kinect dengan biaya paling murah.

Durasi pemindaian paling lama adalah menggunakan laser scanner karena memerlukan keahlian khusus serta ketelatenan dalam memindai. Butuh waktu sekitar 3-4 jam untuk menyelesaikan artefak Patung Laki Asmat. Dalam

penelitian ini, penulis menghabiskan waktu selama 2.5 jam untuk memindai dan masih banyak yang perlu diperbaiki. Kinect scanner menjadi yang paling cepat, namun hasilnya kurang memuaskan. Pengalaman menggunakan Kinect scanner terasa lebih mudah dibandingkan laser scanner karena hanya membutuhkan waktu sekitar 20-30 menit untuk memindai objek. Untuk fotogrametri, waktu dan proses yang dibutuhkan untuk mendapatkan datasets tidak terlalu lama dan cukup mudah yakni sekitar 30-45 menit untuk mendapatkan datasets yang berjumlah sekitar 200-300 foto.

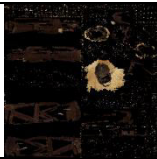
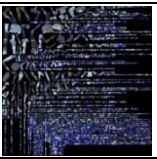




D. *Kualitas*

1) *Akurasi Bentuk*

Berdasarkan siluet bentuk tampak depan, data yang diperoleh melalui 3D scanner merupakan data paling akurat dengan ketajaman yang presisi. Detail yang dihasilkan juga sesuai dengan aslinya, namun beberapa area belum terpindai dengan baik. Hasil melalui kinect, bentuk dasar sudah sedikit terlihat, namun beberapa bagian terlihat hancur dan berantakan. Hasil melalui fotogrametri menghasilkan siluet yang paling mendekati, namun terdapat beberapa noise yang mengganggu pada bagian permukaan, dapat dilihat pada Tabel 4.

Berdasarkan siluet bentuk tampak samping, hasil terbaik didapatkan melalui fotogrametri dan 3D scanner. Kedua metode tersebut menghasilkan bentuk dan siluet yang utuh. Berbeda dengan hasil kinect yang masih banyak kekurangan dari segi bentuk dan siluet.

Tabel 6.
Perbandingan visual berdasarkan kualitas tekstur

	<i>Laser Scanner</i>	<i>Kinect Scanner</i>	Fotogrametri
Data Tekstur			
			
	4096x4096px (4K)	1024x1024px (1K)	8192x8192px (8K)

Tabel 7.
Perbandingan umum tiga teknologi digitisasi 3D berdasarkan kompleksitas proses dan kualitas

Tolak Ukur	<i>3D Laser Scanner</i>	<i>Kinect Scanner</i>	Fotogrametri
Biaya Peralatan	Paling mahal (±124 juta IDR)	Paling murah (±2 juta IDR)	Cukup terjangkau (±8 juta IDR)
Durasi Pemindaian	Waktu lama (3 – 4 jam)	Paling cepat (20 - 30 menit)	Relatif cepat (30 - 45 menit)
Akurasi Bentuk	Paling akurat dan presisi	Beberapa bagian tidak utuh bahkan terlihat hancur	Paling mendekati bentuk & siluet asli
Tingkat Detail	Beberapa detail belum terpindai dengan maksimal	Belum terpindai dengan baik dan kurang detail	Secara visual dan geometri paling utuh mendekati aslinya
Kualitas Tekstur	Tekstur dengan kualitas tinggi namun warna cenderung kusam/gelap dari aslinya (resolusi 4K)	Tekstur tidak berhasil merepresentasikan detail maupun corak aslinya (resolusi 1K)	Tekstur paling akurat dan mendekati visual aslinya (resolusi 8K)

Tabel 8.
Kelebihan dan kekurangan teknologi digitisasi 3D

Teknologi	Kelebihan	Kekurangan
<i>3D Laser Scanner</i>	Akurasi tinggi Cocok untuk permukaan kompleks Tekstur dan geometri yang dihasilkan berkualitas tinggi	Jumlah data yang besar memerlukan perangkat keras yang mumpuni Memerlukan titik referensi untuk mempermudah pemindaian Memerlukan usaha dan keahlian yang tinggi Durasi yang cukup lama Harga yang mahal
<i>Kinect Scanner</i>	Mudah digunakan Proses pemindaian cepat Proses rekonstruksi cepat Harga alat sangat terjangkau	Kualitas tekstur dan geometri yang dihasilkan kurang akurat Menghasilkan <i>noise</i> yang mengganggu hasil pemindaian
Fotogrametri	Akurasi tinggi Durasi relatif singkat Secara umum dapat dipelajari dengan mudah Tekstur dan geometri yang dihasilkan berkualitas tinggi	Memerlukan pencahayaan yang baik Memerlukan kualitas data set yang baik Proses rekonstruksi yang relatif cukup lama diluar proses pemindaian menggunakan perangkat lunak dan komputer (bergantung pada spesifikasi komputer).

2) *Tingkat Detail*

Berdasarkan perbandingan visual tingkat detail, pada bagian kepala dan anting, hasil dari fotogrametri secara visual paling mendekati aslinya, secara geometri hasil fotogrametri juga paling utuh. Pada hasil laser scanner, bagian kepala memiliki kualitas detail dan geometri yang baik, namun beberapa bagian belum terpindai dengan baik. Pada hasil kinect scanner, bentuk dasar kepala sudah terbentuk, namun dari segi tekstur dan akurasi, hasil kinect belum maksimal, dapat dilihat pada Tabel 5.

Pada bagian tengah tubuh, hasil laser scanner terlihat sangat derail namun pada bagian kaki bawah kanan terdapat bagian yang belum terpindai karena kesulitan untuk memindai bagian bawah, pada hasil kinect bentuk tubuh tidak sempurna dan tangan tidak terlihat. Pada hasil fotogrametri, bentuk tubuh terpindai secara utuh, dan garis-garis corak terbentuk pada tesktur dan geometri.

Pada bagian detail belakang kaki, hasil paling baik

didapatkan melalui fotogrametri, corak dan detail kaki terpindai dengan baik. Pada hasil laser scanner, bagian sudut-sudut perpotongan antara artefak dengan meja terlihat tidak rapi dan berlubang. Pada hasil kinect scanner, terlihat bagian putih pada bawah kaki yang merupakan pertanda area tersebut belum terpindai dengan baik.

3) *Kualitas Tekstur*

Tekstur yang dihasilkan yang paling akurat dan paling baik diperoleh melalui metode fotogrametri yang menghasilkan tekstur dengan resolusi 8K, serta keakuratan warna yang mendekati foto aslinya. Tekstur yang dihasilkan oleh laser scanner juga memiliki kualitas yang tinggi, namun warna yang dihasilkan cenderung kusam dan gelap. Tekstur yang dihasilkan kinect scanner tidak merepresentasikan detail maupun corak yang ada pada artefak, dapat dilihat pada Tabel 6.

Dari paparan di atas, berikut merupakan kesimpulan perbandingan secara umum dari kompleksitas proses dan

kualitas yang dihasilkan oleh ketiga teknologi digitisasi 3D yang dapat dilihat pada Tabel 7 – 8.

Kelebihan dan kekurangan teknologi pemindaian dibuat berdasarkan tinjauan pustaka, pengalaman, dan keahlian peneliti selama menggunakan alat tersebut. Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan laser scanner dan fotogrametri dapat menjadi opsi untuk pengarsipan digital warisan budaya yang efektif dengan tingkat akurasi dan kualitas yang dihasilkan cukup tinggi. Namun berdasarkan kemudahan, durasi, dan keterjangkauan, fotogrametri menjadi pilihan terbaik serta efisien karena hanya memerlukan kamera dan pencahayaan yang baik, dengan harga yang terjangkau, durasi pemindaian yang singkat, dan kemudahan praktik yang dapat dipelajari oleh konservator atau peneliti

IV. KESIMPULAN

Dari serangkaian proses analisis perbandingan visual dan teknis yang dilakukan pada ketiga teknologi digitisasi 3D mengenai kompleksitas dan kualitasnya, didapati beberapa temuan yang perlu diperhatikan sebagai berikut: (1) Berdasarkan kompleksitas objek dan kompleksitas proses, laser scanner dapat menghasilkan kualitas yang tinggi namun memerlukan usaha yang besar untuk memindai objek karena durasi yang diperlukan cukup lama, peralatan tambahan yang cukup banyak, serta pengalaman pelaku digitisasi terhadap teknologi memerlukan keahlian yang tinggi; (2) Fotogrametri dapat menghasilkan luaran dengan kualitas tinggi dengan usaha tingkat moderat untuk menangkap gambar tumpang tindih yang cukup banyak untuk menghasilkan objek yang akurat. Berdasarkan durasi, peralatan, dan biaya, fotogrametri merupakan opsi terbaik untuk menghasilkan objek warisan budaya digital yang baik dan akurat; (3) Kinect scanner dalam penelitian ini, tidak dapat menghasilkan kualitas geometri yang baik, sehingga kurang cocok sebagai alat pengarsipan warisan budaya. Berdasarkan durasi, Kinect scanner memindai dengan sangat cepat. Berdasarkan peralatan, alat yang dibutuhkan juga tidak terlalu banyak dan menjadi opsi paling murah, namun dengan kualitas yang kurang dari segi visual.

Berdasarkan perbandingan kualitas visual berupa tingkat detail, akurasi bentuk, dan kualitas tekstur, laser scanner dan fotogrametri memenuhi kebutuhan teknologi yang diperlukan untuk digitisasi warisan budaya yang efektif. Pertimbangan selanjutnya adalah ketersediaan anggaran, peralatan, dan teknis digitisasi. Dalam penelitian ini, fotogrametri menjadi solusi terbaik yang efektif serta efisien dari segi kualitas visual, keterjangkauan, dan kemudahan teknis dari kompleksitas prosesnya yang dapat diaplikasikan untuk museum tingkat menengah kebawah yang memerlukan digitisasi 3D berkualitas tetapi dengan biaya yang terjangkau dan mudah dilakukan.

Penelitian ini jauh dari kata sempurna, teknologi akan terus berkembang terutama dalam bidang digitisasi dan dokumentasi warisan budaya. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar atau referensi dalam melakukan digitisasi 3D warisan budaya untuk peneliti, konservator, pegiat budaya, dan pengelola museum dengan skala menengah kebawah untuk menentukan teknologi yang akan digunakan dalam pengarsipan digital warisan budaya

berdasarkan kebutuhan dan hasil yang diharapkan, serta ketersediaan biaya dan pengalaman pelaku digitisasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi yang telah mendanai studi penulis melalui Program Beasiswa Unggulan. Penulis juga mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya untuk yang telah membantu penulis dalam hal teknis penelitian dan penulisan, Terima kasih penulis sampaikan pada: (1) Banung Grahita, M.Ds., Ph.D., yang telah membimbing, memberi arahan, dan memberi masukan kepada penulis selama penelitian; (2) Agustiana M.Ds., yang telah membantu penulis dalam hal proses dan teknis penelitian; (3) Staf Tata Usaha DKV ITB yang telah membantu penulis mengurus administrasi dan perizinan terhadap akses peralatan dan artefak.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. (Risda) Asfina and R. (Ririn) Ovilia, "Be proud of Indonesian cultural heritage richness and be alert of its preservation efforts in the global world," *Humanus: Jurnal Ilmiah Ilmu-ilmu Humaniora*, vol. 15, no. 2, pp. 195–206, Feb. 2016, doi: 10.24036/JH.V15I2.6428.
- [2] A. Jagielska-Burduk, M. Pszczyński, and P. Stec, "Cultural heritage education in UNESCO cultural conventions," *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 3548*, vol. 13, no. 6, p. 3548, Mar. 2021, doi: 10.3390/SU13063548.
- [3] W. M. W. Isa, N. A. M. Zin, F. Rosdi, and H. M. S. Sarim, "Digital preservation of intangible cultural heritage," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 12, no. 3, pp. 1373–1379, 2018, doi: 10.11591/ijeecs.v12.i3.pp1373-1379.
- [4] G. Pavlidis, A. Koutsoudis, F. Arnaoutoglou, V. Tsioukas, and C. Chamzas, "Methods for 3D digitization of cultural heritage," *J Cult Herit*, vol. 8, no. 1, pp. 93–98, Jan. 2007, doi: 10.1016/J.CULHER.2006.10.007.
- [5] D. Pritchard *et al.*, "Study on quality in 3D digitisation of tangible cultural heritage," in *Proceedings of the Joint International Event 9th ARQUEOLÓGICA*, Valencia: UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA, Apr. 2021, pp. 1–7.
- [6] F. Sahala Samosir and S. Riyadi, "Comparison of smartphone and DSLR use in photogrammetry," in *AESCIART: International Conference on Aesthetics and the Sciences of Art*, Bandung: Institut Teknologi Bandung, Sep. 2020.