

PLATFORM VISUALISASI 3D IMERSIF UNTUK PELESTARIAN BERKELANJUTAN WARISAN BUDAYA DI KALIMANTAN TIMUR

Eko Agung Syaputra¹⁾, Ramadhan Paninggalih²⁾, Hesti Rosita Dwi Putri³⁾, Novianti Rossalina⁴⁾

^{1,3}Desain Komunikasi Visual, Fakultas Pembangunan Berkelanjutan, Institut Teknologi Kalimantan

²Informatika, Fakultas Sains dan Teknologi Informasi, Institut Teknologi Kalimantan

⁴Laboratorium Arsitektur dan Desain, Laboratorium Terpadu, Institut Teknologi Kalimantan

Email: eko.agung@lecturer.itk.ac.id

Abstrak

Perkembangan teknologi imersif telah mengubah cara pelestarian dan diseminasi warisan budaya, memungkinkan museum menghadirkan pengalaman interaktif dan personal di luar batas ruang dan waktu. Penelitian ini memperkenalkan serta mengevaluasi *Lamiang Nusantara*, sebuah platform visualisasi 3D imersif yang dirancang untuk melestarikan dan mempromosikan warisan budaya Kalimantan Timur melalui representasi digital yang dinamis. Dengan menggunakan metode *design sprint* yang mengintegrasikan prototyping iteratif dan keterlibatan pemangku kepentingan, penelitian ini berfokus pada peningkatan akurasi render, responsivitas sistem, dan interaktivitas pengguna. Uji kinerja komparatif menunjukkan bahwa Luma AI memberikan fidelitas visual tertinggi dengan nilai RMS serendah 0,00063, jauh lebih unggul dibandingkan Polycam (0,01275) dan LiDAR (0,05245). Meskipun LiDAR kurang sesuai untuk digitalisasi artefak detail karena tingkat error yang tinggi (CMDM 0,378595), metode ini tetap efektif untuk pemetaan ruang berskala besar. Sementara itu, Polycam menawarkan keseimbangan optimal antara kualitas dan aksesibilitas sehingga praktis untuk digitalisasi massal. Evaluasi pengguna menghasilkan skor rata-rata 2,317 pada kategori “sangat setuju”, yang menegaskan bahwa visualisasi 3D imersif mampu meningkatkan pemahaman artefak budaya sekaligus kesadaran terhadap pelestarian warisan budaya. Hasil ini menegaskan signifikansi ilmiah dan praktis teknologi imersif dalam memperluas akses publik serta mendorong pelestarian budaya berkelanjutan di Kalimantan Timur.

Kata Kunci: Kalimantan Timur, Pelestarian Digital, Teknologi 3D, Visualisasi Imersif, Warisan Budaya

Abstract

The advancement of immersive technologies has transformed the preservation and dissemination of cultural heritage, enabling museums to deliver interactive and personalized experiences beyond spatial and temporal boundaries. This study introduces and evaluates Lamiang Nusantara, a 3D immersive visualization platform designed to preserve and promote East Kalimantan's cultural heritage through dynamic digital representation. Employing a design sprint methodology that integrates iterative prototyping and stakeholder engagement, the research focuses on improving rendering accuracy, system responsiveness, and user interactivity. Comparative performance testing reveals that Luma AI provides the highest visual fidelity with RMS values as low as 0.00063, significantly outperforming Polycam (0.01275) and LiDAR (0.05245). Although LiDAR demonstrates limited suitability for detailed artifact digitization due to higher error rates (CMDM 0.378595), it remains effective for large-scale spatial mapping. Conversely, Polycam offers an optimal balance between quality and accessibility, making it practical for large-scale digitization. User evaluation recorded an average score of 2.317 in the “strongly agree” category, confirming that immersive 3D

visualization enhances cultural artifact comprehension and raises awareness of heritage preservation. These findings highlight the scientific and practical significance of immersive technologies in broadening public access and fostering sustainable cultural preservation in East Kalimantan.

Keywords: 3D Technology, Cultural Heritage, Digital Preservation, East Kalimantan Immersive Visualization,

Correspondence author: Eko Agung Syaputra, eko.agung@lecturer.itk.ac.id, Balikpapan, and Indonesia



This work is licensed under a CC-BY-NC

PENDAHULUAN

Kalimantan Timur, yang dihuni oleh beragam kelompok etnis seperti Dayak, Kutai, Banjar, dan Bugis, memiliki warisan budaya yang kaya, tercermin melalui artefak, pertunjukan, dan ritual (Ningsih, 2023). Namun, arus globalisasi, keterbatasan dokumentasi, serta museum tradisional yang masih mengandalkan tampilan statis membatasi aksesibilitas dan keterlibatan publik (Hasanah et al., 2025). Dibandingkan dengan wilayah lain di Indonesia, inisiatif pelestarian digital di Kalimantan Timur masih relatif tertinggal (Apriani et al., 2025). Untuk menjawab kesenjangan tersebut, penelitian ini menekankan pentingnya pendekatan adaptif dan inklusif bagi para pemangku kepentingan dan desainer yang terlibat dalam desain partisipatif (Nabillah et al., 2024). Penelitian ini menggunakan metodologi *Design Sprint*—meliputi empati, definisi, ideasi, prototipe, dan validasi—yang dipadukan dengan uji pengguna serta analisis regresi linier berganda untuk mengukur keterlibatan, kegunaan, dan nilai budaya yang dirasakan (Baskoro et al., 2025). Proses *co-creation* yang melibatkan ahli budaya, desainer, dan pengguna akhir memastikan efektivitas teknologi sekaligus menjaga keaslian budaya (Syaputra, et al., 2023).

Hasil penelitian ini berkontribusi pada optimalisasi teknologi imersif untuk pelestarian warisan budaya, dengan menawarkan solusi berskala lokal, nasional, hingga global. Kebaruan studi ini terletak pada integrasi visualisasi 3D imersif, metodologi *Design Sprint*, dan evaluasi kuantitatif yang menghasilkan implikasi akademis maupun praktis bagi pelestarian budaya berkelanjutan. Selain sebagai media promosi warisan budaya, platform ini juga mendukung visi *Smart City* Ibu Kota Nusantara melalui pemanfaatan teknologi informasi dan komunikasi (TIK) serta media interaktif untuk keberlanjutan budaya.

Penelitian-penelitian terdahulu yang relevan antara lain: tinjauan sistematis rekonstruksi 3D dalam konteks VR warisan budaya (Rodriguez-Garcia et al., 2024); perbandingan kinerja instrumen survei 3D (Lunghi et al., 2024); aplikasi teknologi 3D dan VR/AR untuk warisan budaya takbenda (Skublewska-Paszkowska et al., 2022); desain interior museum berbasis holografi dan VR (Quan et al., 2024); artefak museum berbasis VR seluler untuk meningkatkan keterlibatan (Sooai et al., 2017); serta evaluasi kepuasan pengguna dalam museum digital (Masnadi, 2023). Meskipun berbagai studi tersebut menunjukkan kemajuan dalam rekonstruksi 3D, pemindaian, dan pengalaman imersif, sebagian besar masih bersifat umum dan belum mengintegrasikan strategi optimasi kinerja yang mencakup kualitas *rendering*, responsivitas sistem, dan efisiensi model dengan pendekatan desain iteratif serta analisis statistik.

Dengan demikian, penelitian ini mengembangkan (i) platform museum 3D imersif untuk warisan budaya Kalimantan Timur, (ii) penerapan kerangka kerja *Design Sprint* sebagai metodologi *co-creation*, dan (iii) penggunaan analisis regresi linier berganda untuk memodelkan hubungan antara keterlibatan, aksesibilitas, dan kualitas visual. Hasil penelitian ini memberikan dasar berbasis data untuk mengoptimalkan alur visualisasi dan pengalaman pengunjung dalam pelestarian warisan budaya digital yang berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metodologi *Design Sprint*, yaitu sebuah kerangka kerja terstruktur, berpusat pada pengguna, dan bersifat iteratif yang dirancang untuk mempercepat pengembangan konsep serta prototipe produk (Fajareno, 2024). Metode ini dipilih karena mampu menghasilkan solusi inovatif, menciptakan prototipe dengan cepat, dan melakukan validasi langsung kepada pengguna sebelum diterapkan dalam skala besar. Proses *Design Sprint* dibagi menjadi lima tahap berurutan: *understand*, *diverge*, *decide*, *prototype*, dan *validate* (Fajareno, 2025).

Tahap 1: Understand

Tahap awal berfokus pada identifikasi tantangan dan peluang dalam visualisasi warisan budaya Kalimantan Timur. Tinjauan pustaka dilakukan terkait digitalisasi artefak, informatika museum, dan teknik visualisasi 3D. Wawasan tambahan diperoleh melalui wawancara dengan pakar budaya, kurator, dan calon pengguna. Hal ini memastikan rancangan platform selaras dengan keaslian budaya sekaligus menjawab kebutuhan pengguna akan aksesibilitas dan apresiasi warisan budaya.

Tahap 2: Diverge

Pada tahap ini, berbagai alternatif konsep desain dihasilkan melalui sesi *brainstorming*, meliputi gaya penyajian artefak, struktur navigasi, dan fitur interaktif. Enam objek budaya representatif dengan variasi material dan ukuran dipilih untuk didigitalkan menggunakan enam aplikasi pemindaian 3D. Untuk mengoptimalkan akurasi deteksi, objek berukuran 20–60 cm digunakan, menyeimbangkan keterbatasan LiDAR dengan artefak berukuran kecil (Wu dkk., 2020). ariasi warna juga diperhitungkan karena kinerja LiDAR lebih baik pada objek berwarna terang (Schaefer, 2025). Tahap ini mendorong eksperimen dengan berbagai pendekatan pemindaian sebelum dipersempit pada opsi yang paling layak secara teknis.

Tabel 1. 6 Produk Budaya dari Kalimantan Timur

	Penangkin Bemban Penangkin Bemban merupakan keranjang anyaman tradisional yang dibuat dari rotan bemban. Keranjang ini secara luas digunakan oleh masyarakat lokal untuk membawa hasil pertanian seperti buah-buahan dan sayuran, serta untuk kebutuhan penyimpanan rumah tangga. Ciri khasnya terletak pada kekuatan anyaman dan motif unik yang menghiasinya. Artefak ini merepresentasikan kearifan budaya, fungsi utilitarian, serta keterampilan tangan masyarakat adat Kalimantan.
	Sampit Pulos Sampit Pulos adalah wadah anyaman berbahan dasar rotan yang secara tradisional digunakan dalam praktik upacara adat di Kalimantan. Benda ini berfungsi sebagai tempat sesaji maupun wadah pemberian dalam kegiatan ritual. Selain dikenal karena kekuatan dan ketelitian dalam teknik anyamannya, Sampit Pulos juga memiliki makna simbolis yang erat kaitannya dengan tradisi ritual dan nilai kebersamaan masyarakat.
	Mandau Mandau merupakan senjata tradisional ikonik masyarakat Dayak yang ditandai dengan bilah bermata tunggal, dihiasi ukiran rumit serta ornamen emas. Lebih dari sekadar senjata, Mandau menjadi simbol budaya yang merepresentasikan kekuatan, identitas, keterampilan artistik, sekaligus nilai spiritual yang diwariskan dalam tradisi Dayak.

	Talawang Talawang adalah perisai kayu yang secara historis digunakan oleh masyarakat Dayak sebagai alat perlindungan dalam peperangan. Perisai ini dibuat dari kayu yang kuat namun ringan, serta dihiasi motif khas Dayak yang melambangkan keberanian, ketangguhan, dan identitas budaya. Pada masa kini, Talawang tidak hanya berfungsi sebagai artefak budaya, tetapi juga sebagai objek ornamen yang mencerminkan warisan seni Dayak yang tetap lestari.
	Tas Anjat Anjat adalah tas punggung tradisional yang dianyam dari rotan atau bambu alami, sering dihiasi pola geometris dengan kontras warna yang khas. Anjat memadukan fungsi praktis dengan ekspresi budaya; ringan, kuat, dan ramah lingkungan. Pada masa lalu digunakan untuk membawa kebutuhan sehari-hari, kini Anjat berkembang menjadi produk budaya kontemporer yang juga diapresiasi sebagai aksesoris fesyen etnik, sekaligus menonjolkan keterampilan dan kearifan lokal Dayak.
	Tenun Ulap Doyo Ulap Doyo adalah kain tenun tradisional yang dihasilkan oleh masyarakat Dayak Benuaq di Kalimantan Timur. Kain ini ditenun dari serat tanaman doyo dengan teknik yang diwariskan secara turun-temurun, menekankan aspek keberlanjutan dan kesinambungan budaya. Warna-warna alami serta pola geometris yang dihadirkan melambangkan keharmonisan antara kreativitas manusia, warisan budaya, dan lingkungan alam. Ulap Doyo menjadi representasi khas warisan budaya takbenda Kalimantan Timur.

Tahap 3: Decide

Tahap pengambilan keputusan dilakukan dengan memprioritaskan strategi visualisasi menggunakan matriks yang menyeimbangkan relevansi budaya, kelayakan teknis, dan pengalaman pengguna. Fitur terpilih meliputi rotasi objek 3D, perbesaran, anotasi, dan narasi interaktif. Tim juga membandingkan tiga teknologi pendukung: fotogrametri, LiDAR, dan *neural radiance fields* (NeRF). Fotogrametri menghasilkan tekstur detail namun sensitif terhadap pencahayaan, LiDAR memberikan geometri akurat tetapi terbatas pada detail permukaan, sedangkan NeRF menghasilkan *rendering* fotorealistis dengan kebutuhan komputasi tinggi. Berdasarkan kemudahan penggunaan dan ketersediaan, Polycam dipilih untuk uji fotogrametri dan LiDAR, sementara Luma AI digunakan untuk mengevaluasi aplikasi NeRF. Proses pemindaian dilakukan dengan dua perangkat: (i) Apple iPhone 13 Pro yang dilengkapi sensor LiDAR dan sistem tiga kamera, serta (ii) OPPO Reno 5 dengan sistem empat kamera beresolusi tinggi pada harga terjangkau. Kedua perangkat ini memungkinkan perbandingan efektivitas biaya dan kinerja teknis.

Tabel 2.

Fitur aplikasi yang diidentifikasi dengan alat pemindaian untuk perangkat Android dan iOS

Application	Supported Technique(s)	Subscription Fee	Free Export Format(s)	Number of Free Exports	Editing Tools	Object Masking (P)	User Rating
Polycam 1.3.10	P, L	USD 14.99/month	.gltf	Unlimited	Yes	Yes	4.3/5 (16,227)
Widar 4.1.3	P, L	USD 9.99/month	None	Not available	Yes	No	3.7/5 (2,268)

Kiri Engine 4.4.0	P	USD 15.99/month	.obj	3 per week	Yes	No	4.1/5 (1,231)
Luma AI 1.3.8	N	Free	.fbx, .obj, .glb, .gltf, .usdz, .stl, .ply, .xyz, .dae	Unlimited	Yes	No	4.7/5 (1,575)
MagiScan 1.9.7	P), L	USD 9.99/month	.fbx, .obj, .glb, .gltf, .usdz, .stl, .ply	3 per account	No	No	4.0/5 (4,936)
Scaniverse 3.1.2	P, L	Free	.fbx, .obj, .glb, .gltf, .usdz, .stl, .ply	Unlimited	Yes	No	4.8/5 (7,585)

Tahap 4: Prototype

Pada tahap pembuatan prototipe, konsep yang terpilih diwujudkan menjadi museum 3D imersif yang dapat diakses melalui <https://lamiangnusantara.com>. Model digital artefak budaya direkonstruksi dengan memperhatikan detail tekstur dan akurasi, kemudian diintegrasikan ke dalam lingkungan virtual. Fitur interaktif seperti panel deskriptif, visualisasi komparatif, dan panduan naratif ditambahkan untuk meningkatkan keterlibatan edukatif dan kultural. Prototipe menekankan simulasi realistis meskipun belum sepenuhnya disempurnakan, sehingga dapat digunakan dalam uji coba pengguna.

Tahap 5: Validate

Tahap validasi melibatkan 50 partisipan, termasuk mahasiswa, pendidik, dan praktisi budaya. Pendekatan metode campuran digunakan: survei untuk mengukur kepuasan dan hasil pembelajaran yang dirasakan, serta wawancara untuk mendapatkan wawasan kualitatif. Parameter teknis seperti kecepatan *rendering* dan respons interaksi juga dievaluasi. Temuan dari tahap ini digunakan untuk penyempurnaan iteratif dalam rangka mengoptimalkan representasi budaya dan pengalaman pengguna.

Secara keseluruhan, kerangka kerja *Design Sprint* terbukti efektif dalam mengintegrasikan keahlian budaya dengan desain iteratif berbasis pengguna. Metodologi ini memfasilitasi pengembangan sistematis platform museum 3D imersif yang tidak hanya mendorong pelestarian digital, tetapi juga memperluas aksesibilitas publik serta memperkuat keterlibatan budaya berkelanjutan terhadap warisan Kalimantan Timur.

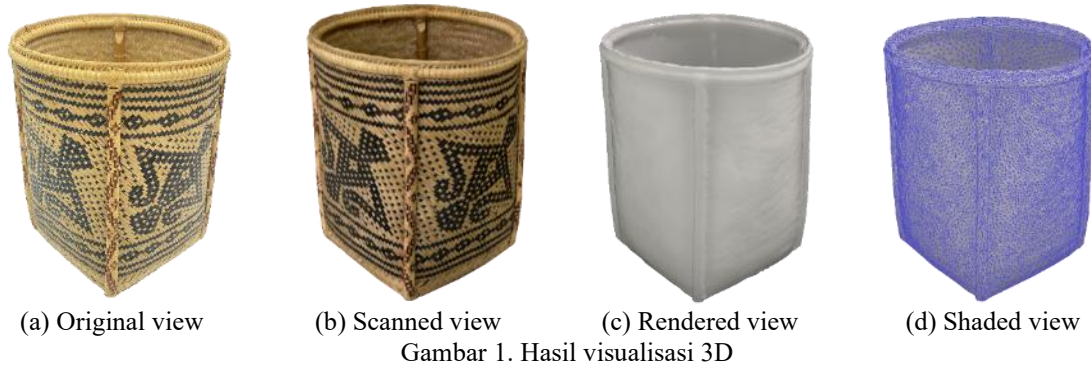
HASIL DAN PEMBAHASAN

Evaluasi terhadap prototipe museum 3D imersif dilakukan dengan menggunakan artefak warisan budaya Kalimantan Timur, termasuk tekstil tradisional seperti Ulap Doyo, kerajinan anyaman, serta objek ritual. Setiap artefak didigitalkan melalui perangkat bergerak yang dilengkapi aplikasi LiDAR dan fotogrametri, dengan tujuan menilai akurasi pemindaian, ketepatan visual, serta kegunaannya untuk presentasi digital.

Proses digitalisasi mengikuti protokol standar, meliputi pengaturan pencahayaan yang konsisten, pergerakan perangkat yang stabil, serta penghindaran permukaan transparan atau reflektif yang dapat mengganggu integritas model. Hasil uji perbandingan menunjukkan bahwa Luma menghadirkan antarmuka pengguna yang lebih detail dibandingkan Polycam, meskipun membutuhkan waktu akuisisi lebih lama, rata-rata delapan menit per pemindaian dibandingkan empat menit pada Polycam. Untuk memperoleh cakupan geometri yang menyeluruh, digunakan platform berputar berdiameter 50 cm guna menangkap objek dari berbagai sudut.

Pembuatan model tidak dibandingkan secara langsung karena kedua aplikasi bergantung pada pemrosesan berbasis cloud. Namun, integrasi Polycam dengan LiDAR memungkinkan sebagian perhitungan dilakukan secara lokal, sehingga waktu pemrosesan dapat dipangkas menjadi sekitar 1,5–3 menit. Dalam praktiknya, Polycam mampu menyelesaikan pembuatan model dalam 3–5 menit, sedangkan Luma memerlukan hingga 10 menit, tergantung beban server.

Temuan ini menunjukkan adanya kompromi antara efisiensi pemindaian dan kekayaan antarmuka, dengan Polycam lebih sesuai untuk alur kerja digitalisasi cepat, sedangkan Luma menawarkan detail visual yang lebih tinggi dengan konsekuensi waktu pemrosesan yang lebih panjang.



Hasil pengukuran model 3D dirangkum dalam Tabel 3. Data menunjukkan bahwa jumlah poligon pada model high-poly Luma AI sekitar 9–10 kali lebih banyak dibandingkan model medium-poly, dan hampir 50 kali lebih tinggi dibandingkan model low-poly. Temuan ini mengindikasikan bahwa model high-poly tidak selalu optimal untuk aplikasi augmented reality (AR), karena kepadatan poligon yang berlebihan menuntut kapasitas pemrosesan perangkat yang signifikan. Implikasi dari trade-off antara ketepatan visual dan kinerja sistem ini dibahas lebih lanjut pada Bagian 4.

Tabel 3.

Data diekstraksi dari fitur-fitur yang ditentukan setiap model 3D, dikategorikan sebagai HP = *High Poly*, MP = *Medium Poly*, LP = *Low Poly*, dan OP = *Optimized*.

Object	Type	Scanning Application	Device Used	Size (MB)	Polygon Count	Texture's Size (MB)	NR-3DQA	MM-PCQA
Mandau	HP	Luma AI	iPhone Pro	99.10	989.782	18.34	0.7731	86.34
	MP	Luma AI	iPhone Pro	14.31	148.793	13.49	0.8149	83.23
	LP	Luma AI	iPhone Pro	2.41	23.521	10.54	0.7483	84.58
	OP	Polycamp	iPhone Pro	3.55	38.349	0.53	0.7543	80.40
	OP	Polycamp	Reno 5	1.01	19.458	2.34	0.8122	82.59
Ulap Doyo Weaving	HP	Luma AI	iPhone Pro	99.45	988.768	8.45	0.6576	78.54
	MP	Luma AI	iPhone Pro	13.45	149.543	5.46	0.6692	70.34
	LP	Luma AI	iPhone Pro	2.44	24.332	3.56	0.6467	66.34
	OP	Polycamp	iPhone Pro	0.56	26.545	0.75	0.4563	20.48
	OP	Polycamp	Reno 5	1.87	18.566	1.78	0.5467	65.66
Anjat Bag	HP	Luma AI	iPhone Pro	98.78	967.756	2.39	0.7456	79.76
	MP	Luma AI	iPhone Pro	13.43	149.654	1.95	0.7989	61.43
	LP	Luma AI	iPhone Pro	2.68	24.425	1.86	0.6420	72.31
	OP	Polycamp	iPhone Pro	0.76	10.355	0.43	0.6467	42.45
	OP	Polycamp	Reno 5	1.64	10.835	2.38	0.7125	63.33
Penangkin Bemban	HP	Luma AI	iPhone Pro	96.87	961.689	2.34	0.606	77.56
	MP	Luma AI	iPhone Pro	12.48	142.345	1.94	0.7453	54.57
	LP	Luma AI	iPhone Pro	2.39	22.457	1.38	0.556	71.34
	OP	Polycamp	iPhone Pro	0.34	9.345	0.34	0.564	43.44
	OP	Polycamp	Reno 5	1.239	10.455	1.28	0.669	61.34
Sampit Pulos	HP	Luma AI	iPhone Pro	91.45	941.345	2.25	0.740	66.35
	MP	Luma AI	iPhone Pro	10.34	139.744	1.23	0.7453	65.86
	LP	Luma AI	iPhone Pro	1.34	20.034	1.11	0.721	65.74
	OP	Polycamp	iPhone Pro	0.34	8.678	0.65	0.724	62.23
	OP	Polycamp	Reno 5	1.34	8.506	1.23	0.711	63.34
Talawang	HP	Luma AI	iPhone Pro	39.34	329.043	6.53	0.796	76.553
	MP	Luma AI	iPhone Pro	13.23	149.689	4.79	0.7962	73.890
	LP	Luma AI	iPhone Pro	2.34	24.562	3.45	0.7345	69.753
	OP	Polycamp	iPhone Pro	1.23	13.456	1.34	0.4324	69.565
	OP	Polycamp	Reno 5	3.83	36.553	1.23	0.6424	72.345

Analisis lebih lanjut memperlihatkan bahwa Luma AI secara konsisten menghasilkan model high-poly berukuran besar dan tekstur yang lebih kompleks dibandingkan Polycam, terutama karena algoritme multi-tekstur adaptif yang digunakannya. Sementara Polycam umumnya menghasilkan satu tekstur berukuran 4096×4096 pada fotogrametri berbasis Android, atau tekstur dengan tinggi bervariasi melalui LiDAR iOS, Luma secara dinamis menyesuaikan resolusi tekstur berdasarkan kompleksitas objek dan kepadatan poligon, sehingga memberikan pendekatan render yang lebih fleksibel.

Penilaian kualitas semakin menegaskan perbedaan tersebut. Hasil NR-3DQA menunjukkan Luma umumnya lebih unggul daripada Polycam, dengan pengecualian terbatas seperti pada artefak Talawang, di mana Polycam memperoleh skor 45% lebih tinggi. Pada artefak lain, misalnya Sampit Pulos, selisih performa relatif kecil (6%). Analisis MM-PCQA turut memperkuat keunggulan rekonstruksi high-poly, memperlihatkan bahwa meskipun kedua platform cukup memadai, Luma memberikan hasil yang lebih konsisten secara keseluruhan. Perbedaan paling mencolok tampak pada output berbasis iOS, di mana Ulap Doyo Weaving (74%) dan Tas Anjat (46%) menunjukkan defisit visual signifikan ketika diproses menggunakan Polycam. Rata-rata, Luma AI melampaui Polycam sebesar 17,78% (NR-3DQA Android), 22,73% (NR-3DQA iOS), 9,43% (MM-PCQA Android), dan 28,19% (MM-PCQA iOS). Hasil ini menegaskan keunggulan Luma AI dalam hal adaptabilitas dan ketepatan render, sekaligus menyoroti relevansinya dalam optimalisasi lingkungan museum 3D imersif untuk pelestarian warisan budaya Kalimantan Timur.

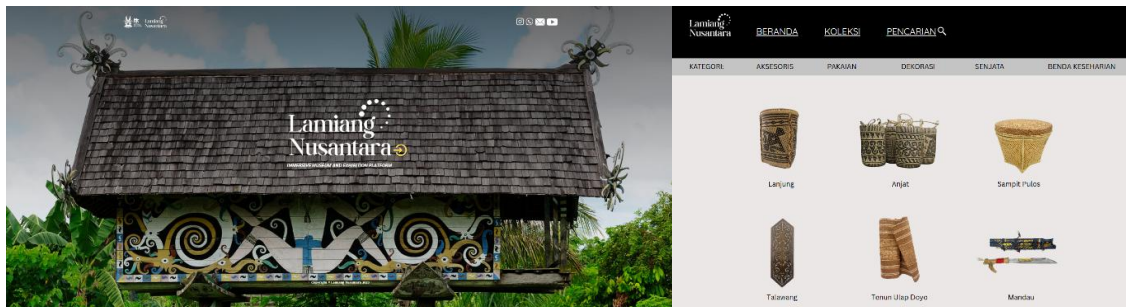
Tabel 4. Evaluasi mesh 3D dilakukan menggunakan Cloud Compare dan CDM

Object	Type	Type Compared	Scanning Application	RMS	CMDM
Mandau	MP	HP, MP	Luma	0.00063	0.213349
	LP	HP, LP	Luma	0.00231	0.223456
	OP	Polycam	Polycam	0.01275	0.212345
	OP	HP, Poly Reno 5	Polycam	0.03245	0.323578
	OP	HP, Poly iPhone	Polycam	0.03757	0.378595
Ulap Doyo Weaving	MP	HP, MP	Luma	0.00018	0.235340
	LP	HP, LP	Luma	0.00075	0.234692
	OP	Polycam	Polycam	0.04525	0.159632
	OP	HP, Poly Reno 5	Polycam	0.03456	0.345974
	OP	HP, Poly iPhone	Polycam	0.02346	0.349698
Anjat Bag	MP	HP, MP	Luma	0.00024	0.153559
	LP	HP, LP	Luma	0.00087	0.189953
	OP	Polycam	Polycam	0.03453	0.235495
	OP	HP, Poly Reno 5	Polycam	0.00523	0.234854
	OP	HP, Poly iPhone	Polycam	0.05245	0.345925
Penangkin Bemban	MP	HP, MP	Luma	0.00026	0.167893
	LP	HP, LP	Luma	0.00077	0.197897
	OP	Polycam	Polycam	0.03457	0.234466
	OP	HP, Poly Reno 5	Polycam	0.00585	0.233678
	OP	HP, Poly iPhone	Polycam	0.04158	0.367843
Sampit Pulos	MP	HP, MP	Luma	0.00012	0.113476
	LP	HP, LP	Luma	0.00053	0.124378
	OP	Polycam	Polycam	0.02316	0.211247
	OP	HP, Poly Reno 5	Polycam	0.00434	0.212346
	OP	HP, Poly iPhone	Polycam	0.03225	0.232467
Talawang	MP	HP, MP	Luma	0.00025	0.094863
	LP	HP, LP	Luma	0.00143	0.199576
	OP	Polycam	Polycam	0.08346	0.245874
	OP	HP, Poly Reno 5	Polycam	0.03419	0.235973
	OP	HP, Poly iPhone	Polycam	0.24579	0.359789

Lebih lanjut, evaluasi memperlihatkan bahwa perbedaan ketepatan visual antara Luma AI dan rekonstruksi berbasis fotogrametri relatif moderat, yakni sekitar 10–20%. Secara khusus, output medium-poly Luma mencapai presisi tertinggi (RMS 0,00063) dibandingkan model

fotogrametri Polycam yang dioptimalkan (RMS 0,01275). Sebaliknya, rekonstruksi berbasis LiDAR menunjukkan deviasi yang jauh lebih tinggi, hingga 70% (RMS 0,05245 untuk output low-poly), yang menandakan keterbatasannya dalam mendigitalkan artefak budaya dengan detail halus. Temuan ini menegaskan keandalan Luma AI, terutama ketika didukung integrasi Neural Radiance Field (NeRF), sebagai solusi yang kuat untuk rekonstruksi 3D berkualitas tinggi. Meskipun Polycam tetap unggul dari sisi aksesibilitas dan alur kerja hibrid fotogrametri–LiDAR, hasil berbasis LiDAR terbukti kurang akurat (CMDM 0,378595), sehingga lebih tepat digunakan untuk pemetaan spasial berskala besar daripada digitalisasi artefak.

Dalam kerangka evaluasi kinerja dan optimalisasi museum 3D imersif warisan budaya Kalimantan Timur, hasil penelitian ini menyarankan agar Luma AI diprioritaskan untuk visualisasi detail artefak budaya, sementara Polycam berbasis fotogrametri dapat berperan sebagai alternatif praktis untuk digitalisasi berskala luas sekaligus meningkatkan aksesibilitas museum.



Gambar 2. Tampilan produk budaya di website Lamiang Nusantara

Untuk mengevaluasi kegunaan, fungsionalitas, dan efektivitas platform, tim peneliti mengembangkan prototipe museum digital **Lamiang Nusantara**. Uji coba pengguna melibatkan 50 responden dari berbagai latar belakang, termasuk mahasiswa, pendidik, praktisi budaya, dan masyarakat umum. Tujuan utama uji coba adalah mengukur tingkat kepuasan pengguna serta menilai bagaimana teknologi visualisasi 3D memengaruhi pemahaman terhadap artefak budaya Kalimantan Timur. Sepuluh butir evaluasi dirumuskan dengan menggunakan skala Likert lima poin (1 = sangat tidak setuju, 5 = sangat setuju), mencakup aspek antarmuka, integrasi konten, interaktivitas, hingga nilai edukasi. Data survei dianalisis untuk menangkap tingkat kepuasan keseluruhan sekaligus mengidentifikasi area yang memerlukan perbaikan.

Kerangka evaluasi mencakup sepuluh dimensi: (1) kejelasan dan kemudahan penggunaan antarmuka situs, (2) efektivitas visualisasi 3D dalam meningkatkan pemahaman artefak, (3) responsivitas lintas perangkat, (4) intuisi navigasi 3D, (5) akurasi dan proporsionalitas representasi artefak, (6) integrasi teks dan visual dengan model 3D, (7) detail visual dan realisme dalam menyampaikan nilai budaya, (8) kemampuan menumbuhkan minat terhadap warisan Kalimantan Timur, (9) efektivitas sebagai media edukasi pelestarian budaya, dan (10) kesediaan pengguna merekomendasikan platform.

Tabel 5. Hasil pernyataan yang diuji kepada koresponden

Correspondents	Statements										Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	47
2	4	5	5	5	4	4	5	4	3	5	44
3	5	4	4	4	5	5	4	5	5	5	46
4	4	4	4	5	5	5	4	5	5	5	47
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	50
6	4	5	5	5	4	4	5	5	5	5	47
7	4	5	5	5	5	5	5	4	5	5	48
8	5	5	5	4	5	5	4	5	5	5	48
9	5	5	5	4	4	5	5	5	5	5	48
10	5	5	5	4	3	5	5	5	5	5	47
11	5	5	5	4	4	5	5	5	5	5	48

12	4	5	4	4	4	5	5	5	5	5	46
13	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	50
14	4	4	3	3	5	5	4	4	5	5	42
15	5	5	4	3	5	5	5	5	5	5	47
16	5	4	4	4	5	5	5	5	4	4	45
17	5	4	4	4	4	4	5	5	5	5	45
18	5	4	4	4	5	5	5	5	5	4	46
19	5	5	4	4	4	4	4	4	5	5	44
20	5	5	4	4	5	5	5	5	5	5	48
21	5	4	4	3	5	5	5	5	5	5	46
22	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	45
23	5	4	4	4	4	5	5	5	5	5	46
24	4	4	4	4	4	4	5	5	5	4	43
25	5	5	3	3	5	5	5	5	5	5	46
26	5	5	4	3	5	5	5	5	5	5	47
27	4	5	5	5	4	4	5	5	5	5	47
28	4	5	5	5	5	5	5	4	5	5	48
29	5	5	5	4	5	5	4	5	5	5	48
30	5	5	5	4	4	5	5	5	5	5	48
31	5	5	4	3	5	5	5	5	5	5	47
32	5	4	4	4	5	5	5	5	4	4	45
33	5	4	4	4	4	4	5	5	5	5	45
34	5	5	5	4	5	5	4	5	5	5	48
35	5	5	5	4	4	5	5	5	5	5	48
36	5	5	4	3	5	5	5	5	5	5	47
37	5	4	4	4	5	5	5	5	4	4	45
38	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	45
39	5	4	4	4	4	5	5	5	5	5	46
40	4	4	4	4	4	4	5	5	5	4	43
41	5	5	3	3	5	5	5	5	5	5	46
42	4	4	3	3	5	5	4	4	5	5	42
43	5	5	4	3	5	5	5	5	5	5	47
44	5	4	4	4	5	5	5	5	4	4	45
45	5	4	4	4	4	4	5	5	5	5	45
46	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	50
47	4	4	3	3	5	5	4	4	5	5	42
48	5	5	4	3	5	5	5	5	5	5	47
49	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	49
50	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	48
Total	2.317										

Analisis data skala Likert menghasilkan skor total 2.317 dari 50 partisipan yang merespons sepuluh item evaluasi. Untuk menginterpretasikan hasil ini, beberapa parameter statistik diturunkan, dengan a menunjukkan nilai skala terendah, k jumlah partisipan, dan p jumlah item. Berdasarkan parameter-parameter ini, skor minimum (mn), skor maksimum (ml), median (md), kuartil pertama (Q1), dan kuartil ketiga (Q3) dihitung. Kerangka kerja statistik ini memungkinkan interpretasi respons pengguna yang lebih terstruktur, memberikan wawasan tidak hanya tentang kepuasan keseluruhan tetapi juga tentang distribusi dan variabilitas evaluasi partisipan.

$$mn = k \times p \times b \quad (1)$$

$$= 50 \times 10 \times 1 = 500$$

$$ml = t + p + a \quad (2)$$

$$= 50 \times 10 \times 5 = 2.500$$

$$md = (ml + mn) / 2 \quad (3)$$

$$= (2.500 + 500) / 2 = 1.500$$

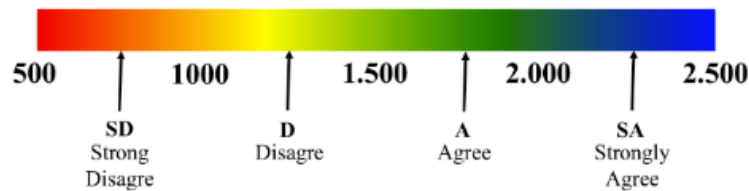
$$k1 = (mn + md) / 2 \quad (4)$$

$$= (500 + 1.500) / 2 = 1.000$$

$$k3 = (ml + md) / 2 \quad (5)$$

$$= (2.500 + 1.500) / 2 = 2.000$$

Hasil perhitungan dari analisis skala Likert selanjutnya digunakan untuk mengidentifikasi distribusi relatif nilai skor, seperti yang disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil perhitungan pada skala likert

Skor keseluruhan 2.317, yang termasuk dalam kategori sangat setuju, memberikan bukti kuat bahwa penerapan visualisasi 3D secara substansial meningkatkan pemahaman dan evaluasi pengguna terhadap artefak budaya. Hasil ini selanjutnya menyiratkan dampak positif dalam meningkatkan kesadaran dan kepedulian pengguna terhadap pelestarian warisan budaya. Oleh karena itu, hasil penilaian prototipe ini memiliki relevansi yang signifikan bagi upaya keberlanjutan budaya yang lebih luas, khususnya dalam meningkatkan aksesibilitas bagi beragam audiens untuk berinteraksi dengan produk budaya di berbagai konteks geografis.

Selain itu, evaluasi ini menyoroti tingkat kepuasan peserta yang tinggi terhadap fungsionalitas visualisasi 3D dan pengalaman platform secara keseluruhan. Fitur visualisasi ini sangat dihargai karena kemampuannya menampilkan artefak dari berbagai sudut pandang, sehingga menawarkan representasi yang lebih autentik dan akurat secara kontekstual dari kondisi aslinya.

SIMPULAN

Penelitian ini menilai sekaligus menyempurnakan platform museum imersif 3D untuk pelestarian warisan budaya Kalimantan Timur melalui perbandingan kinerja Luma AI, fotogrametri Polycam, dan model berbasis LiDAR. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Luma AI, dengan dukungan integrasi NeRF, memiliki ketepatan visual yang lebih unggul; sementara fotogrametri Polycam menawarkan kompromi praktis antara aksesibilitas dan kualitas, serta LiDAR lebih sesuai untuk pemetaan ruang berskala besar daripada detail artefak. Uji coba pengguna turut memvalidasi kemampuan platform dalam meningkatkan pemahaman dan keterlibatan budaya, sekaligus menegaskan fungsi gandanya sebagai media pelestarian dan sarana edukasi. Dari perspektif ilmiah, penelitian ini memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi visualisasi imersif melalui integrasi metodologi *design sprint* dan evaluasi kinerja kuantitatif. Secara praktis, penelitian ini sejalan dengan inisiatif pelestarian warisan budaya digital Indonesia dan strategi pembangunan *Smart City*. Namun demikian, studi ini masih memiliki keterbatasan berupa jumlah data yang relatif kecil, ketergantungan pada perangkat

pemindaian berbasis ponsel, serta pemrosesan berbasis *cloud*. Penelitian selanjutnya perlu memperluas cakupan artefak budaya, mengintegrasikan teknologi pemindaian yang lebih canggih, serta mengeksplorasi optimalisasi *real-time rendering* dengan melibatkan kelompok pengguna yang lebih luas dan beragam guna menjamin skalabilitas, autentisitas, dan keberlanjutan pelestarian budaya.

DAFTAR PUSTAKA

- Apriani, F., Irawan, B., Fatmala, A. N. P., Saputri, A. S., & Jannah, R. (2025). Upaya Pemajuan Kebudayaan Kalimantan Timur Oleh Pemerintah Daerah dan Pelaku Pemajuan Kebudayaan Lainnya. *Jurnal Impresi Indonesia*, 4(5), 1615-1630.
- Baskoro, D. B., Kusuma, W. T., & Anshori, M. (2025). Perancangan Virtual Reality Research Expo Menggunakan Design Sprint Untuk Meningkatkan Keterlibatan Pengguna. *Joisie (Journal Of Information Systems And Informatics Engineering)*, 9(1), 260-268.
- Fajareno, V. P. (2024). *Perancangan Prototype Menggunakan Metode Design Sprint (Studi Kasus: Inkubator Bisnis Dan Teknologi)* (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Malang).
- Fajareno, V. P. (2025). Pengembangan Prototype Menggunakan Metode Design Sprint (Studi Kasus: Inkubator Bisnis Dan Teknologi). *Jurnal Repositor*, 7(1).
- Hasanah, E. L., Majdina, A. N., & Enzelluthfiyah, L. (2025). Heritage yang Terlupakan Analisis Tantangan Museum Warisan Budaya di Era Museum Interaktif dan Digital. *Nazharat: Jurnal Kebudayaan*, 31(1), 42-56.
- Lunghi, I., Vannini, E., Dal Fovo, A., Di Sarno, V., Rocco, A., & Fontana, R. (2024). A Performance Comparison of 3D Survey Instruments for Their Application in the Cultural Heritage Field. *Sensors*, 24(12), 3876.
- Masnadi, I., Rosman, D., Levyta, F., & Adiati, M. P. (2023, July). Evaluating the Visitor Satisfaction on Cultural Heritage Digital Museum in Google Arts and Culture: A Study of Puppet Museum Jakarta. In *2023 International Conference on Digital Applications, Transformation & Economy (ICDATE)* (pp. 1-4). IEEE.
- NABILLAH, S., SUMITRA, N. R., & ROHIMAH, I. (2024). Revolusi Teknologi: Implementasi Museum Teknologi dalam Menciptakan Pariwisata Interaktif di Era Society 5.0. *PETA-Jurnal Pesona Pariwisata*, 3(1), 26-32.
- Ningsih, K. A. (2023). *Representasi Perempuan dalam Tata Kelola Dewan Kesenian Daerah Kalimantan Timur* (Doctoral dissertation, Institut Seni Indonesia Yogyakarta).
- Quan, F., Liu, P., Jiang, W., & Gao, Y. (2024). Visiting experience of digital museum interior design based on virtual reality and sensor networks. *Measurement: Sensors*, 33, 101232.
- Rodriguez-Garcia, B., Guillen-Sanz, H., Checa, D., & Bustillo, A. (2024). A systematic review of virtual 3D reconstructions of Cultural Heritage in immersive Virtual Reality. *Multimedia Tools and Applications*, 83(42), 89743-89793.
- Schaefer, C., Sotubadi, S. V., Kootbally, Z., Schlenoff, C., & Nguyen, V. (2025). Design and Validation of Edge Case Test Artifact for Evaluation of Automated Driving LiDAR and Radar Sensors. *Journal of Testing and Evaluation*, 53(4).
- Skublewska-Paszkowska, M., Milosz, M., Powroznik, P., & Lukasik, E. (2022). 3D technologies for intangible cultural heritage preservation—literature review for selected databases. *Heritage Science*, 10(1), 3.
- Sooai, A. G., Nugroho, A., Al Azam, M. N., Sumpeno, S., & Purnomo, M. H. (2017, December). Virtual artifact: Enhancing museum exhibit using 3D virtual reality. In *2017 TRON Symposium (TRONSHOW)* (pp. 1-5). IEEE.
- Syaputra, E. A., Mujahidin, S., Sartika, W., & Rossalina, N. (2023). Integration of 3D Scanning and Augmented Reality (AR) Technology in East Kalimantan Furniture Products in E-Commerce. *VCD*, 8(2).
- Wu, Y., Wang, Y., Zhang, S., & Ogai, H. (2020). Deep 3D object detection networks using LiDAR data: A review. *IEEE Sensors Journal*, 21(2), 1152-1171.