

## Arsitektur Dunia Maya: Analisis Dampak Pemodelan 3D Terhadap Efisiensi Klinis, Manufaktur Aditif, dan Ekonomi Media Secara Sistematis

**Hadhitya Rahman**

Animasi, Universitas Negeri Padang

\* e-mail: [Hadhigan42@gmail.com](mailto:Hadhigan42@gmail.com)

### Abstract

Laporan penelitian ini mengulas evolusi, metodologi fundamental, dan aplikasi multidisiplin tentang teknologi pemodelan tiga dimensi (3D) dalam mempengaruhi global digital secara komprehensif. Berawal dari eksperimen grafis pada awal 1960-an melalui sketchpad, pemodelan 3D telah berevolusi dari sekedar alat visualisasi statis menjadi wujud infrastruktur penting yang telah mendukung banyak sektor. Penelitian ini memaparkan klasifikasi metodologis yang mencakup pemodelan Poligonal, Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS), Pematangan Digital (Digital Sculpting), fotogrametri berbasis Structure from Motion (SfM), dan Generasi Prosedural. Melalui analisis literatur dan studi kasus secara kuantitatif, laporan ini juga menunjukkan dampak transformatif teknologi ini. Pada sektor medis, penggunaan model anatomis cetak 3D pada perencanaan pra-operasi terbukti mengurangi lama operasi hingga 9 menit pada prosedur robotik dan mengurangi risiko margin bedah positif secara signifikan. Di industri hiburan, pergeseran menuju aset digital yang dapat digunakan Kembali mengubah struktur biaya produksi, di mana animasi 3D menawarkan efisiensi jangka Panjang dibandingkan produksi live-action. Sektor pendidikan mencatat adanya peningkatan retensi pengetahuan hingga 75% melalui pelatihan basis Virtual Reality (VR) yang didukung dengan Model 3D, dibandingkan dengan metode Konvensional. Kemudian, laporan ini juga menginvestigasi transformasi besar dari Generative AI dan Neural radiance fields (NeRF), yang menjanjikan pendemokrasian Pembuatan Konten 3D dan Simulasi fisika yang akurat secara semantik.

**Keywords:** Pemodelan 3D, Fotogrametri, Generative AI, Perencanaan Bedah Digital, Building Information Modeling (BIM), Virtual Reality (VR), Efisiensi Manufaktur, Pelestarian Warisan Budaya.

Article History: Received on 12/01/2025; Revised on 16/01/2026; Accepted on 26/01/2026; Published Online: 5/02/2026



Licensees may copy, distribute, display and perform the work and make derivative works and remixes based on it only if they give the author or licensor the credits (attribution) in the manner specified by these. Licensees may copy, distribute, display, and perform the work and make derivative works and remixes based on it only for non-commercial purposes.

### PENDAHULUAN

Pemodelan 3D (3D Modelling) tidak hanya sebagai representasi visual, ia merupakan proses matematis kompleks yang merekonstruksi properti spasial, volumetrik, dan tekstural dari objek fisik atau imajiner ke dalam bentuk ruang digital Cartesian. Intinya, Model 3D terdiri atas kumpulan titik data (vertices) yang dihubungkan oleh tepi (edges) untuk membentuk wajah (Faces) atau poligon, yang secara kolektif membangun jaring (mesh) tiga dimensi.[1] Namun, dalam era komputasi modern, definisi ini telah berkembang menjadi entitas data yang kaya

informasi. Model 3D saat ini tidak hanya menyimpan data geometris, tetapi juga properti fisik seperti massa, densitas, elastisitas (Modulus Young), dan perilaku termal, memungkinkan mereka berfungsi sebagai “Kembaran Digital” (Digital Twin) yang akurat untuk simulasi dunia nyata.[2]

Urgensi penerapan pemodelan 3D telah meluas melampaui batas estetika industri hiburan. Bahkan Dalam teknik sipil, ia menjadi fondasi Building Information Modeling (BIM) yang mengelola siklus hidup bangunan. Dalam Kedokteran, ia menjadi jembatan antara pencitraan diagnostik 2D dan intervensi bedah 3D. Integrasi teknologi ini mendefinisikan ulang batas antara dunia fisik dan digital, menciptakan paradigma baru dalam cara manusia merancang, menganalisis, dan berinteraksi dengan lingkungannya.[4]

Awal Mula Pemodelan 3D dimulai dari seorang penemu istilah “Grafika Komputer” bernama William Fetter pada tahun 1961 untuk menggambarkan simulasi Kokpit Pesawat.[1] Namun, Tonggak interaktivitas sejati dimulai oleh Ivan Sutherland pada tahun 1963 dengan program Sketchpad di MIT. Sketchpad memperkenalkan konsep manipulasi grafis langsung pada layar, menetapkan model bagi Computer-Aided Design (CAD) modern dan Graphic User Interface (GUI).[1]

Pada Tahun 1970-an lahirlah algoritma Rendering dan pemodelan permukaan yang lebih canggih. Pada tahun tersebut, Martin Newell menciptakan “Utah Teapot” yang ikonik, sebuah model matematika teko the yang dipilih karena kompleksitas topologinya-memiliki lubang pegangan, tutup, dan cerat yang ideal untuk menguji algoritma bayangan dan pemetaan tekstur.[5] Pada periode ini juga menandakan transisi dari representasi wireframe sederhana ke pemodelan solid yang mampu merepresentasikan volume.

Antara 1980-1990-an, merupakan era komersialisasi dan demokratisasi, pada awalnya perangkat lunak seperti AutoCAD, disusul dengan 3DS Max, hingga Blender, mulai tersedia kepada pasar yang lebih luas dan tidak lagi eksklusif untuk laboratorium riset elit. Rilisnya film animasi seperti Toy Story dari Pixar pada tahun 1995 membuktikan Viabilitas Komersial dari Animasi 3D penuh, mengubah industri film selamanya dan memicu investasi besar-besaran dalam teknologi CGI.[6]

Memasuki abad ke-21 dan dekade 2020-an, fokus Pemodelan 3D mulai bergeser menuju realisme fotorealistik waktu nyata (real-time), didorong oleh GPU yang kuat dan integrasi kecerdasan buatan. Teknologi seperti Neural Radiance Fields (NeRF) dan pemodelan generatif kini memungkinkan komputer untuk "memahami" dan merekonstruksi geometri 3D dari input minimal, menandai fajar baru otomatisasi dalam desain.[7]

Laporan ini bertujuan untuk memberikan analisis komprehensif yang tidak hanya deskriptif tetapi juga evaluatif. Analisis akan mencakup metodologi teknis pembuatan model, studi efisiensi kuantitatif dalam aplikasi industri (medis, konstruksi, hiburan), serta tinjauan kritis terhadap tren

masa depan. Tujuannya untuk menyediakan wawasan strategis bagi para profesional mengenai pemodelan 3D dapat diimplementasikan untuk meningkatkan akurasi, efisiensi, dan inovasi.

## **METODE**

Keberhasilan penerapan pemodelan 3D sangat bergantung pada pemilihan teknik yang tepat. Berbagai industri telah mengadopsi metodologi yang berbeda sesuai dengan kebutuhan spesifik mereka akan presisi, efisiensi topologi, atau realisme organik. Pemodelan terbagi menjadi beberapa metode, seperti:

Pemodelan poligonal, merupakan metode yang paling dominan di dalam industri hiburan, game, dan animasi. Objek direpresentasikan melalui mesh yang terdiri atas poligon (biasanya berbentuk segitiga (dalam game) atau segi empat (pada film dan animasi)).

Mekanisme Proses pemodelan poligonal seringkali dimulai dari bentuk primitif (Kubus, Bola) yang kemudian dimodifikasi melalui ekstrusi, pemotongan, dan penggabungan verteks. Arah garis-garis pada Topologi poligon sangatlah krusial. Topologi yang buruk dapat menyebabkan artefak visual saat model tersebut dianimasikan, terutama pada area deformasi seperti siku atau wajah karakter.<sup>[1]</sup>

Untuk mencapai tingkat kehalusan permukaan tanpa menggunakan jutaan poligon secara manual, maka digunakanlah teknik subdivision surface. Algoritma subdivision surface secara otomatis membagi setiap poligon menjadi unit-unit yang lebih kecil dan menghaluskan sudut-sudutnya, memungkinkan seniman bekerja pada model resolusi rendah (low-poly) sementara hasil akhirnya menjadi sangat halus (high-poly).<sup>[10]</sup>

Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS), berbeda dengan polygon yang merupakan aproksimasi diskrit dari permukaan, NURBS menggunakan fungsi matematika untuk mendefinisikan kurva dan permukaan dengan presisi absolut. Satu Teknik yang digunakan pada metode NURBS Adalah penggunaan aplikasi industry seperti Rhinoceros atau CATIA, biasanya digunakan oleh industri, karena sifatnya yang matematis, Model NURBS dapat diskalakan dalam angka vektor tanpa batas adanya kehilangan penghalusan, yang sangat vital untuk proses manufaktur tinggi dalam permesinan CNC.<sup>[1]</sup>

Digital Sculpting (Pematangan Digital), yakni proses memanipulasi Geometri dan mengubah objek tersebut menjadi bentuk baru, biasanya menggunakan perangkat lunak seperti ZBrush, dan melibatkan seniman 3D seakan sedang mengubah tanah liat Digital. Jutaan poligon pada model yang dapat digeser, ditarik, bahkan dapat ditekan secara real-time. Fitur seperti Dynamic Tessellation atau Voxel Sculpting memungkinkan penambahan detail geometri secara dinamis hanya pada area yang membutuhkan, tanpa membebani seluruh model. Karena hasil patung digital seringkali punya topologi yang kacau dan jumlah poligon yang sangat besar, dapat mengakibatkan proses komputasi yang berat, maka diperlukan proses retopologizing untuk

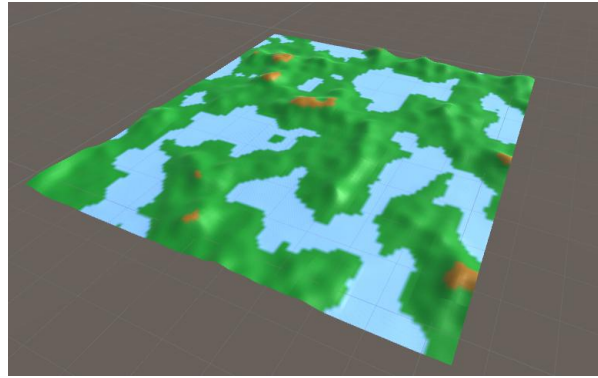
membangun ulang mesh yang efisien di atas permukaan patung tersebut agar siap untuk dianimasikan.<sup>[10]</sup>



**Gambar 1** Proses Sculpting Digital.

Fotogrametri dan Structure from Motion (SfM), merupakan jembatan antara dunia fisik dan digital, memungkinkan akuisisi data 3D dari objek nyata. SfM merupakan teknik fotogrametri yang paling fleksibel. SfM bekerja dengan menganalisis serangkaian foto 2D yang tumpang tindih dari berbagai sudut. Perangkat lunak mendeteksi “fitur kunci” (keypoint descriptor) menggunakan algoritma seperti SIFT (Scale-Invariant Feature Transform). Dengan melacak pergerakan fitur-fitur ini antar gambar, sistem melakukan triangulasi untuk menghitung posisi 3D titik tersebut dan posisi kamera pada saat pengambilan gambar.<sup>[13]</sup> Teknik SfM demokratis karena hanya membutuhkan kamera standar (bahkan ponsel pintar) dan perangkat lunak pemrosesan, berbeda dengan pemindaian laser (LiDAR) yang memerlukan peralatan mahal. Ini menjadikannya metode utama dalam pelestarian warisan budaya dan survei geologi.<sup>[15]</sup>

Generasi Prosedural (Procedural Content Generation), merupakan teknik yang mengandalkan algoritma dan aturan matematis untuk menciptakan konteks secara otomatis, bukan manual. Teknik ini mengandalkan fungsi noise (seperti Perlin Noise) dan fraktal untuk mensimulasikan ketidakaturan alam, seperti medan pegunungan, awan, atau tekstur marmer. Dalam arsitektur dan game, grammar-based generation (seperti L-Systems untuk tanaman) digunakan untuk membangun struktur kompleks yang bervariasi tanpa batas.<sup>[17]</sup> Ini memungkinkan pengembang game yang menciptakan dunia yang luas (infinite worlds) dengan penggunaan memori yang efisien.



**Gambar 2** Gambaran Procedural Generation menggunakan Perlin Noise.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan 3D telah mengubah bagaimana berbagai sektor dalam cara mereka memahami, mengolah, hingga menciptakan. Kali ini kita melihat bagaimana Pemodelan 3D mengubah cara kerja berbagai sektor, baik itu Sektor kesehatan dan Medis; Industri Hiburan dan Media; Arsitektur, konstruksi, dan warisan budaya; Pendidikan dan pelatihan industri, hingga mampu beradaptasi dengan Kecerdasan Buatan (AI).

Sektor kesehatan dan medis, penerapan pemodelan 3D dalam dunia kedokteran telah mengubah fase eksperimental dan telah memberikan dampak klinis yang terukur secara statistik, mengubah standarisasi medis dari “melihat” menjadi “memahami dan berinteraksi”. Melalui konversi data pencitraan medis (MRI/CT Scan) menjadi model 3D digital atau fisik memberikan pemahaman spesial yang superior bagi tim beda, data kuantitatif dari berbagai studi klinis telah menegaskan efektivitasnya. Studi komparatif menunjukkan penggunaan model 3D memberikan penurunan waktu yang signifikan di ruang operasi, yang secara langsung mengurangi biaya dan risiko infeksi pasca operasi.



**Gambar 3** Penggunaan 3D dalam melakukan proses Operasi.

Dalam studi terhadap seorang pasien yang menjalani Robotic-Assisted Radical Prostatetomy (RARP), kelompok yang menggunakan perencanaan model 3D mengalami pengurangan waktu operasi rata-rata sebesar 9 menit (jika dibandingkan dengan kelompok kontrol

yang membutuhkan waktu 222 menit). Ditambah angka Positive Surgical Margins (PSM) yang merupakan indikator tertinggalnya sel kanker turun drastis menjadi 8,1% pada kelompok model 3D jika dibandingkan dengan kelompok pencitraan standar sebesar 28,6%.<sup>[19]</sup> Selain itu, penggunaan panduan potong dan pelat yang dicetak 3D (disesuaikan dengan anatomi pasien) dilaporkan mengurangi waktu operasi rekonstruksi deformitas hingga 22% dan waktu operasi tumor sebesar 8%.<sup>[20]</sup> Dan dengan pemahaman yang lebih baik tentang vaskularisasi kompleks via penggunaan Model 3D, telah berkontribusi pada penurunan rata-rata kehilangan darah, telah tercatat pengurangan sebesar 5mL pada kasus RARP, yang meskipun tampaknya kecil, namun telah menunjukkan adanya peningkatan presisi diseksi jaringan.<sup>[19]</sup>

Penggunaan model 3D juga mempengaruhi metode komunikasi antara dokter dengan pasien. Sekitar 70% ahli bedah menyebutkan bahwa mereka setuju model 3D mampu meningkatkan persetujuan tindakan (informed consent) dari pasien dengan lebih efektif. Pasien melaporkan bahwa terjadi penurunan kecemasan karena mereka dapat memvisualisasikan patologi dan prosedur yang akan dilakukan secara konkret, bukan abstrak.<sup>[21]</sup> Selain itu, 90% ahli bedah juga melaporkan bahwa model fisik sangat membantu komunikasi antar rekan satu profesi (surgeon-to-surgeon) sebelum dilaksanakan operasi kompleks, memungkinkan simulasi strategi bedah yang lebih matang.<sup>[22]</sup>

Selain diterapkan pada komunikasi antar pasien, penggunaan model 3D juga dapat diintegrasikan ke dalam bentuk VR yang mengubah ilmu pendidikan medis dari yang berupa hafalan menjadi pengalaman imersif. Sebuah studi menunjukkan bahwa VR memiliki efek yang signifikan pada memori jangka panjang. Dalam pelatihan keterampilan prosedural, retensi pengetahuan dapat mencapai 75% dengan VR, jauh melampaui metode kuliah tradisional yang hanya meningkatkan retensi pengetahuan sekitar 5-10%.<sup>[23]</sup> Dalam akuisisi keterampilan, Mahasiswa kedokteran gigi yang dilatih menggunakan simulator VR menunjukkan peningkatan skor penilaian sebesar 15% dan mampu mempertahankan keterampilan endodontik 30% lebih lama dibandingkan rekan mereka yang dilatih secara konvensional.<sup>[24]</sup> Hal ini disebabkan karena sifat haptik dari visual VR yang melibatkan memori otot dan kognisi spasial secara bersamaan.

Sektor industri hiburan dan media telah menjadi pendorong utama sekaligus pionir inovasi pemodelan 3D. meskipun persepsi umum seringkali menganggap animasi 3D mahal, analisis terhadap biaya per menit produksi mengungkapkan nuansa efisiensi, terutama untuk proyek berskala besar.<sup>[25]</sup>

**Tabel 1. Perbandingan Struktur biaya produksi: Animasi vs Live Action dengan VFX**

<b>Komponen Biaya</b>	<b>Animasi 3D</b>	<b>Live Action (Berat VFX)</b>	<b>Catatan Analisis</b>
<b>Biaya Rata-rata</b>	\$15.000 - \$35.000 / menit	\$17.000 - \$100.000+ / menit	Live action melibatkan logistik fisik yang mahal (aktor, lokasi, katering).
<b>Tenaga Kerja</b>	40-50% dari anggaran	25-35% dari anggaran	Animasi padat karya spesialis; Live action padat logistik.
<b>Infrastruktur</b>	Render farm & workstation (20-30%)	Kamera, set fisik, & transportasi (15-20%)	Investasi animasi adalah pada aset digital, bukan fisik.
<b>Reusabilitas</b>	Tinggi (Aset dapat dipakai ulang)	Rendah (Set sering dibongkar)	Model 3D karakter/set menjadi aset jangka panjang untuk sekuel/gim.

Tabel tersebut menunjukkan bahwa Animasi 3D mampu menawarkan kontrol biaya yang baik jika dibandingkan dengan Live Action, karena Live Action membutuhkan visualisasi yang fantastis atau lokasi yang tidak mungkin diakses. Risiko variabel yang tak terduga seperti cuaca buruk di lokasi syuting dapat dieliminasi dalam produksi 3D.<sup>[27]</sup>

**Gambar 4** Proses pemodelan karakter.

Industri ini terus berjuang menyeberangi Uncanny Valley, dimana merupakan fenomena karakter digital yang memiliki rupa hampir atau bahkan mirip manusia bisa memicu respon ketidaknyamanan. Dengan adanya tekstur Physically Based Rendering (PBR), memungkinkan tekstur bereaksi terhadap cahaya secara realistis berdasarkan pada hukum fisika, bertujuan untuk meningkatkan realisme material.[8] Bahkan alat seperti Zbrush memungkinkan pengguna

menciptakan detail mikro seperti pori-pori dan kerutan untuk memecahkan hambatan realisme pada karakter digital dalam film blockbuster modern.<sup>[10]</sup>

Pada sektor Architecture, Engineering, and Construction (AEC), pemodelan 3D mengubah metode perancangan menjadi manajemen informasi yang komprehensif. Adanya Penerapan Building Information modeling (BIM) yang mengubah representasi gambar CAD 2D menjadi model 3D. Studi kasus mengungkapkan implementasi sistem manajemen konten BIM yang menambang data lebih dari 30.000 tampilan 3D Proyek Historis.



**Gambar 6** Siklus proses Building Information Modelling (BIM).

Dengan menggunakan algoritma association rule mining, sistem ini mampu memprediksi kebutuhan konten desainer, mengurangi waktu pencarian aset secara drastis dan mengeliminasi redundansi kerja.<sup>[28]</sup> Selain itu, dengan model 3D yang akurat, dan dikombinasikan dengan data historis, terbukti menjadi metode yang paling valid untuk mengurangi biaya inspeksi struktur bangunan dengan memprediksi area risiko tanpa perlu inspeksi fisik menyeluruh yang mahal.<sup>[28]</sup>

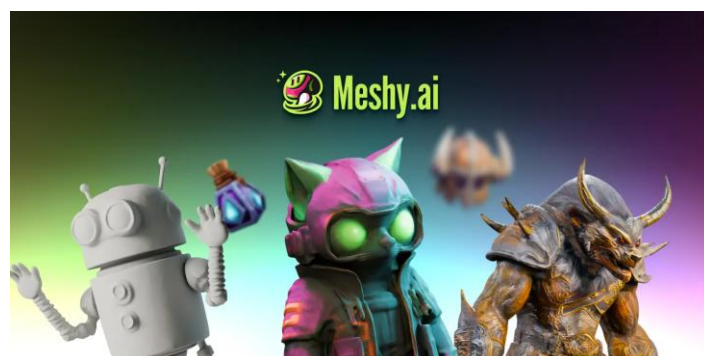
Sementara pada Sektor budaya, adanya Fotogrametri dan pemindaian laser menjadi alat penting dalam mendokumentasikan situs sejarah. Dengan adanya teknik SfM, teknik ini memungkinkan pembuatan replika digital dengan presisi tinggi dari artefak atau situs arkeologi tanpa kontak fisik yang sangat penting terutama untuk objek yang rapuh. Model ini melayani fungsi ganda, sebagai arsip pelestarian jika suatu saat terjadi bencana (seperti kebakaran Notre Dame) dan sebagai sarana edukasi publik melalui museum virtual.<sup>[15]</sup>



**Gambar 7** Penerapan Modelling 3D sebagai Museum Virtual.

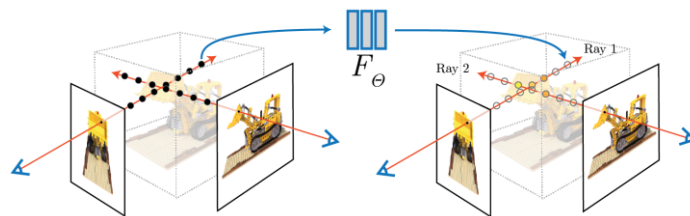
Pada sektor pendidikan dan pelatihan industri, pelatihan berbasis simulasi 3D seringkali menawarkan lingkungan yang aman untuk gagal, yang krusial untuk pekerjaan beresiko tinggi. Riset National Training Laboratory menemukan bahwa retensi pembelajaran melalui pengalaman VR jauh lebih tinggi sebesar 75% jika dibandingkan dengan metode visual pasif atau kuliah. Pada studi industri pengelasan (Welding), siswa yang berlatih dengan simulator VR menunjukkan kinerja uji pengelasan 100% lebih baik dibandingkan dengan siswa yang berlatih dengan cara konvensional.<sup>[23]</sup> Dalam efisiensi waktu, studi kasus Olivia Bistro pada program pelatihan karyawan di industri makanan cepat saji, menunjukkan adanya pengurangan waktu pelatihan yang drastis dari 30-40 jam menjadi hanya 3-6 jam dengan adanya implementasi VR, mewakili efisiensi waktu hingga 6,5 kali lipat.<sup>[30]</sup>

Pemodelan 3D saat ini telah mengalami perubahan hingga mampu memasuki Ranah Generative AI. Dengan hadirnya alat seperti Meshy AI dan Spine yang menggunakan model difusi untuk menghasilkan geometri 3D bertekstur lengkap hanya dengan menggunakan deskripsi teks atau satu gambar input. Google Trends mencatat kenaikan 300% dalam minat terhadap “3D AI”, menandakan adanya gelombang adopsi massal.<sup>[8]</sup> Pada aplikasi E-Commerce, teknologi seperti Dress-1-to-3 mampu menghasilkan model pakaian 3D yang simulasi-siap dari satu foto, lengkap dengan estimasi parameter fisik kain (seperti kekakuan tekukan). Ini berpotensi merevolusi ritel daring yang memungkinkan uji coba virtual (virtual try-on) yang akurat secara fisik, mengurangi tingkat pengembalian barang.<sup>[3]</sup>



**Gambar 8** Meshy AI, Aplikasi Generasi Model menggunakan Algoritma AI  
(Link: [Meshy AI - Buat Model 3D dari Teks dan Gambar dengan AI](#))

Secara fundamental, cara data 3D disimpan sering berubah, dan Neural Radiance Fields (NeRF) merepresentasikan adegan sebagai jaringan saraf kontinyu, bukan sebagai kumpulan poligon diskrit. Ini memungkinkan rekonstruksi fotorealistik dari foto 2D dengan kualitas yang sebelumnya mustahil. Varian baru seperti 3D Gaussian splatting memungkinkan rendering NeRF secara real time, membuka pintu baru bagi aplikasi VR/AR yang sangat realistis pada perangkat konsumen.<sup>[3]</sup>



Gambar 9: cara kerja Neural Radiance Fields (NeRF)

Meskipun dengan adanya kemudahan generasi aset dengan AI, isu hak cipta masih menjadi sorotan. Dengan risiko pelanggaran hak cipta karena pencampuran aset yang ada dalam data pelatihan AI menjadi perhatian utama industri, menuntut kerangka hukum dan etika baru dalam manajemen aset digital 3D.<sup>[3]</sup>

## KESIMPULAN

Pemodelan 3D telah berevolusi dari eksperimen grafis akademik menjadi tulang punggung infrastruktur digital modern. Analisis komprehensif dalam laporan ini menyimpulkan beberapa poin kunci, seperti dampak klinis yang nyata, dimana pemodelan 3D tidak lagi sekedar alat bantu visual, namun juga merupakan instrumen klinis yang terbukti secara statistik meningkatkan keselamatan pasien, mengurangi waktu operasi dan meminimalkan komplikasi bedah. Selain itu, pemodelan 3D juga memberikan efisiensi ekonomi pada sektor industri dan hiburan, dimana investasi awal pembuatan aset 3D terbayar melalui reusabilitas aset, pengurangan rework konstruksi BIM, dan efisiensi pelatihan karyawan yang mencapai penghematan waktu hingga 85%. Pada akhirnya, masa depan pemodelan 3D adalah hibrida. Dimana integrasi Generative AI dan representasi neural (NeRF) akan mendemokratisasi kreasi konten, memungkinkan siapa saja untuk menjadi seorang kreator 3D, sambil menghadirkan tantangan baru terkait dengan validasi data dan hak kekayaan intelektual. Pemodelan 3D kini telah menjadi pilar fundamental dalam transformasi digital, menjembatani imajinasi manusia dengan realitas fisik melalui presisi matematika dan kekuatan komputasi.

**DAFTAR PUSTAKA**

- "3D computer graphics," Wikipedia, 2025. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_computer\\_graphics](https://en.wikipedia.org/wiki/3D_computer_graphics). [Diakses: 11 Des 2025].
- "Evolution of 3D Modeling Techniques and Rise of 3D Printing," Grid Paper Studio, [Online]. Available: <https://www.gridpaperstudio.com/post/the-evolution-of-3d-modeling-techniques-the-rise-of-3d-printing-a-comprehensive-overview>. [Diakses: 11 Des 2025].
- "Next-Generation Creation by 3D Generative AI," Ukiyo Journal, 2025. [Online]. Available: <https://www.ukiyo-journal.com/en/article/3d-ai-future-digital-creator-era>. [Diakses: 11 Des 2025].
- "Understanding 3D Modeling: From Its Evolution To Revolution," 7CGI, [Online]. Available: <https://7cgi.com/blog/understanding-3dmodeling-evolution-to-revolution/>. [Diakses: 11 Des 2025].
- "Evolution 3D Model: How It Changed Industries Forever," NBYIT, [Online]. Available: <https://nbyit.com/evolution-3d-model/>. [Diakses: 11 Des 2025].
- S. Shareef, "The Evolution of 3D Animation: From Classic to Cutting-Edge Techniques," Medium, [Online]. Available: <https://medium.com/@shakeershareef2/the-evolution-of-3d-animation-from-classic-to-cutting-edge-techniques-19d0cb07bcda>. [Diakses: 11 Des 2025].
- Z. Li et al., "Advances in 3D Generation: A Survey," arXiv preprint arXiv:2401.17807, 2024. [Online]. Available: <https://3dvar.com/Li2024Advances.pdf>. [Diakses: 11 Des 2025].
- Antaeus AR, "3D rising, the Best 3D AI Tools of 2025," Medium, 2025. [Online]. Available: <https://medium.com/antaeus-ar/is-3d-ai-on-the-rise-best-3d-ai-tools-of-2025-f553bf95f013>. [Diakses: 11 Des 2025].
- [9] "3D Modeling and Sculpting," Fiveable, [Online]. Available: <https://fiveable.me/art-and-technology/unit-6>. [Diakses: 11 Des 2025].
- "Digital Sculpting: Techniques & Applications," StudySmarter, [Online]. Available: <https://www.studysmarter.co.uk/explanations/computer-science/game-design-in-computer-science/digital-sculpting/>. [Diakses: 11 Des 2025].
- "A Review of various 3-D Modelling Techniques and an Introduction to Photogrammetry," EAI Endorsed Transactions, 2022. [Online]. Available: <https://eudl.eu/pdf/10.4108/eai.16-4-2022.2318159>. [Diakses: 11 Des 2025].
- "A short history of 3D," Adobe Substance 3D, [Online]. Available: <https://helpx.adobe.com/substance-3d-epic/3d-intro/3d-history.html>. [Diakses: 11 Des 2025].
- "Structure from motion (SfM) photogrammetry," Loughborough University Repository, [Online]. Available: <https://repository.lboro.ac.uk/ndownloader/files/17080646/1>. [Diakses: 11 Des 2025].
- "Structure from Motion Introductory Guide," UNAVCO, 2021. [Online]. Available: <https://www.unavco.org/wordpress/wp-content/uploads/2021/06/sfm-intro-guide.pdf>. [Diakses: 11 Des 2025].
- F. Remondino and S. El-Hakim, "Image-based 3D Modelling: A Review," The Photogrammetric Record, vol. 21, no. 115, pp. 269-291, 2006. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/227786426\\_Image-based\\_3D\\_Modelling\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/227786426_Image-based_3D_Modelling_A_Review). [Diakses: 11 Des 2025].
- "Procedural Content Generation in Games: A Survey with Insights on Recent Trends," arXiv preprint arXiv:2410.15644, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/html/2410.15644v1>. [Diakses: 11 Des 2025].
- R. M. Smelik, T. TuteneI, R. Bidarra, and B. Benes, "A Survey on the Procedural Generation of Virtual Worlds," Multimodal Technologies and Interaction, vol. 1, no. 4, p. 27, 2017. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2414-4088/1/4/27>. [Diakses: 11 Des 2025].

- "Impact of 3D printed models on quantitative surgical outcomes," National Library of Medicine, 2023. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10323697/>. [Diakses: 11 Des 2025].
- "The Clinical and Economic Promise of 3D Printing for Surgical Planning," Stratasys White Paper, [Online]. Available: [https://www.stratasys.com/contentassets/4805ccd7bef84896a519cabe32671a13/wp\\_du\\_surgicalplanningpromise\\_a4\\_1216a-web.pdf?v=48fd9f](https://www.stratasys.com/contentassets/4805ccd7bef84896a519cabe32671a13/wp_du_surgicalplanningpromise_a4_1216a-web.pdf?v=48fd9f). [Diakses: 11 Des 2025].
- "Measuring the quality and impact of 3D medical printing in surgical planning," Journal of Medical Engineering & Technology, 2024. [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/24735132.2024.2334601>. [Diakses: 11 Des 2025].
- "The perioperative utility of 3D printed models in complex surgical care," Annals of The Royal College of Surgeons of England, 2022. [Online]. Available: <https://publishing.rcseng.ac.uk/doi/10.1308/rcsann.2022.0127>. [Diakses: 11 Des 2025].
- "Learning Retention Rates with VR," Optima, [Online]. Available: <https://optimaxr.ai/learning-retention-rates-with-vr-are-second-only-to-teaching-someone-else/>. [Diakses: 11 Des 2025].
- "Effectiveness of virtual reality (VR) to enhance the training," Journal of Population Therapeutics and Clinical Pharmacology, [Online]. Available: <https://www.jptcp.com/index.php/jptcp/article/download/7988/7552/17364>. [Diakses: 11 Des 2025].
- "VFX Breakdown in Animation vs. Live-Action: Key Differences," Filmustage, [Online]. Available: <https://filmustage.com/blog/vfx-breakdown-in-animation-vs-live-action/>. [Diakses: 11 Des 2025].
- "The Pros and Cons of 3D Animation," YourFilm, [Online]. Available: <https://your.film/learn/insights/the-pros-and-cons-of-3d-animation/>. [Diakses: 11 Des 2025].
- "Animation VS Live Action Cost: Which Offers Better Budget Value?" Animation Iconic, [Online]. Available: <https://www.animationiconic.com/blog/animation-vs-live-action-cost-value-for-budget>. [Diakses: 11 Des 2025].
- "Content Analysis of Three-Dimensional Model Technologies," PMC, 2024. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11207322/>. [Diakses: 11 Des 2025].
- F. Remondino, "Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning," Remote Sensing, vol. 3, no. 6, pp. 1104-1138, 2011. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2072-4292/3/6/1104>. [Diakses: 11 Des 2025].
- "VR Training and VR Education Statistics 2025," Takeaway Reality, 2025. [Online]. Available: <https://www.takeaway-reality.com/post/vr-training-and-vr-education-statistics-2024>. [Diakses: 11 Des 2025].
- "3D Generative AI Transforms How We Create," SIGGRAPH 2025, [Online]. Available: <https://s2025.siggraph.org/3d-generative-ai-transforms-how-we-create-design-interact-with-digital-content/>. [Diakses: 11 Des 2025].
- T. Lobo, "Understanding Structure From Motion Algorithms," Medium, [Online]. Available: <https://medium.com/@loboateresa/understanding-structure-from-motion-algorithms-fc034875fd0c>. [Diakses: 11 Des 2025].
- "Virtual and augmented reality for biomedical applications," PMC, 2021. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8324499/>. [Diakses: 11 Des 2025].
- "The Quantitative Impact of Using 3D Printed Anatomical Models," PMC, 2023. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10599434/>. [Diakses: 11 Des 2025].
- "Architectural 3D Modelling," Digital Blue Foam, [Online]. Available: <https://www.digitalbluefoam.com/post/architectural-3d-modelling>. [Diakses: 11 Des 2025].

- Z. Li et al., "Advances in 3D Generation: A Survey," arXiv preprint arXiv:2401.17807, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2401.17807>. [Diakses: 11 Des 2025].
- H. Zhang et al., "A Comprehensive Survey on 3D Content Generation," arXiv preprint arXiv:2402.01166, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/html/2402.01166v2>. [Diakses: 11 Des 2025].
- "The effect of VR and traditional videos on learner retention and decision making," ResearchGate, 2019. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/331029915\\_The\\_effect\\_of\\_VR\\_and\\_traditional\\_videos\\_on\\_learner\\_retention\\_and\\_decision\\_making](https://www.researchgate.net/publication/331029915_The_effect_of_VR_and_traditional_videos_on_learner_retention_and_decision_making). [Diakses: 11 Des 2025].