

Pengembangan Platform Toko Virtual Berbasis Metaverse Menggunakan Unity Game Engine

Kannisa Adjani¹, Ahmad Yusuf², Isna Wardiah³, Muhammad Rizki Murtadha⁴

¹Bisnis Digital, ^{2,3,4}Teknik Informatika

¹Universitas Teknologi Bandung, ^{2,3,4}Politeknik Negeri Banjarmasin

¹Banjarmasin, ^{2,3,4}Bandung; Indonesia

¹kannisa@utb-univ.ac.id, ²ahmadyusuf@poliban.ac.id, ³isnawardiah@poliban.ac.id,

⁴c030320073@mahasiswa.poliban.ac.id

Diajukan: 14 Januari 2025; Direvisi: 5 Juni 2025; Diterima: 1 Juli 2025

Abstrak

Keterbatasan pengalaman pengguna dalam platform belanja digital konvensional cenderung berbasis dua dimensi dan kurang interaktif. Studi ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi sebuah platform toko virtual berbasis metaverse bernama Mallverse dengan menggunakan Unity Game Engine. Platform Mallverse dikembangkan dengan pendekatan modular yang mencakup enam fitur utama yaitu login dan register, multiplayer, chat, ekspresi emosi pengguna, runtime character switch, dan sistem belanja interaktif. Arsitektur sistem disusun dengan integrasi teknologi seperti Photon Unity Networking, Unity Animator, dan Unity UI Toolkit. Evaluasi teknis dilakukan melalui pengujian performa sistem berdasarkan parameter load time dan frame per second (FPS) pada 2 (dua) skenario penggunaan secara individu dan simultan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan performa stabil dalam kondisi akses individu maupun simultan. Kesimpulan dari studi ini menegaskan bahwa Unity dapat diandalkan sebagai platform pengembangan metaverse interaktif yang responsif dan efisien untuk mendukung pengalaman belanja digital yang lebih imersif.

Kata kunci: Frame per Second, Load Time, Metaverse, Toko Virtual, Unity.

Abstract

The limitations of user experience in conventional digital shopping platforms are primarily due to their two-dimensional and non-interactive nature. This study aims to develop and evaluate a virtual store platform called Mallverse, based on the metaverse concept and built using the Unity Game Engine. Mallverse was developed using a modular approach, encompassing six core features: login and registration, multiplayer, chat, user emotion expressions, runtime character switching, and an interactive shopping system. The system architecture integrates technologies such as Photon Unity Networking, Unity Animator, and Unity UI Toolkit. Technical evaluation was conducted by testing system performance using two key parameters load time and frames per second (FPS) across two usage scenarios individual and simultaneous access. The results indicate that the system is capable of maintaining stable performance under both conditions. This study concludes that Unity is a reliable development platform for creating responsive and efficient interactive metaverse environments that support a more immersive digital shopping experience.

Keywords: Frame per Second, Load Time, Metaverse, Virtual Mall, Unity.

1. Pendahuluan

Transformasi teknologi digital telah mengubah secara fundamental berbagai aspek kehidupan, termasuk pola masyarakat dalam berbelanja dan berinteraksi dengan produk. Salah satu dampak utamanya adalah peralihan dari toko fisik ke platform digital. Platform ini memfasilitasi akses produk yang fleksibel tanpa batasan waktu dan lokasi, serta meningkatkan efisiensi transaksi, kenyamanan, dan kualitas layanan [1]. Namun, mayoritas antarmuka platform digital saat ini masih bersifat dua dimensi dan statis, sehingga belum mampu merepresentasikan pengalaman eksploratif dan interaktif seperti yang ditemukan di toko fisik [2]. Keterbatasan interaktivitas pada antarmuka dua dimensi dapat menimbulkan ketimpangan persepsi dan keterlibatan pengguna, sehingga berdampak pada aspek kepuasan dan loyalitas pengguna [3]. Permasalahan ini menggarisbawahi urgensi terhadap pemanfaatan teknologi imersif sebagai pendekatan

alternatif yang mampu menyimulasikan pengalaman belanja yang lebih interaktif, kontekstual, dan menyerupai *realitas* fisik.

Salah satu bentuk teknologi imersif yang berkembang dalam berbagai sektor adalah metaverse. Perkembangan teknologi metaverse telah merevolusi paradigma interaksi konsumen dengan produk dan layanan digital. Teknologi ini menyediakan representasi ruang virtual tiga dimensi yang mendukung interaksi, eksplorasi, dan transaksi pengguna dalam konteks digital [4]. Menurut Lee et al. (2021), metaverse didefinisikan sebagai konvergensi antara dunia fisik dan digital yang menyediakan konsep *real-time interaction* di lingkungan virtual yang saling terhubung. Sementara itu, transformasi digital yang berkembang pesat memberikan potensi terhadap pemanfaatan metaverse dalam berbagai aspek. Beberapa studi terdahulu telah menunjukkan bahwa metaverse mampu melakukan transformasi digital di berbagai bidang seperti pembelajaran dan pendidikan [5], [6], promosi [7], hingga bisnis [8], [9]. Teknologi ini juga membuka peluang bagi terciptanya ruang baru untuk hiburan dan interaksi sosial, serta memiliki potensi besar dalam mendorong transformasi digital sektor perdagangan [10].

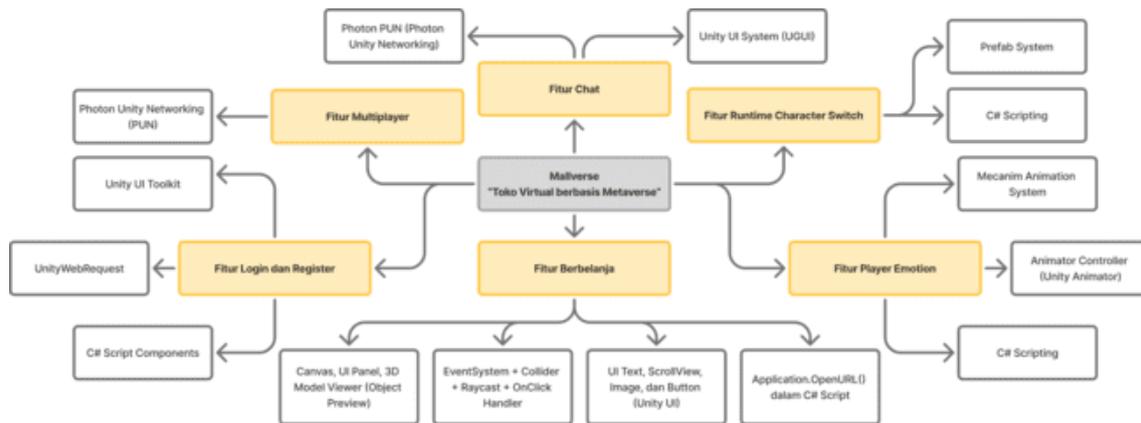
Sementara itu, konsep toko virtual telah berkembang menjadi medium interaksi yang imersif, sosial, dan adaptif terhadap preferensi pengguna. Studi [11] menggarisbawahi bahwa kemampuan pengguna untuk merasa "hadir" bersama pengguna lain secara virtual memainkan peran penting dalam meningkatkan pengalaman interaktif. Tingkat kehadiran virtual yang tinggi terbukti berperan dalam memperkuat persepsi emosional konsumen, meningkatkan kesadaran terhadap merek, serta membangun loyalitas pelanggan [11]. Menurut [12], interaksi langsung dengan produk dalam metaverse memperkuat personalisasi dan mendorong kepuasan pelanggan. Hal ini menunjukkan bahwa metaverse berpotensi melahirkan model bisnis baru dengan sistem transaksi daring yang aman dan terintegrasi [13], [14].

Saat ini, fokus utama sebagian besar platform metaverse masih terbatas pada aspek hiburan dan pameran (*game-oriented* dan *showcase-centric*) [15], [16], [17]. Hal ini menyebabkan keterbatasan dalam implementasi transaksi aktual serta kurangnya personalisasi pengalaman belanja dalam lingkungan virtual. Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk mengembangkan toko virtual atau disebut Mallverse menggunakan tiga elemen utama yaitu lingkungan 3D interaktif, pengalaman sosial multipengguna, dan integrasi transaksi belanja. Platform ini dikembangkan untuk meningkatkan kualitas pengalaman belanja digital, serta memfasilitasi pengguna dalam menjelajahi toko belanja secara virtual, berinteraksi dengan produk dalam bentuk tiga dimensi, serta merasakan nuansa toko fisik melalui sistem representasi digital. Selain itu, studi ini berfokus pada evaluasi performa teknis platform melalui dua indikator utama yaitu waktu muat (*load time*) dan *frame rate per second (FPS)* untuk menilai kelancaran akses sistem serta kestabilan visualisasi selama proses eksplorasi.

2. Metode Penelitian

2.1. Pendekatan Pengembangan

Mallverse dikembangkan menggunakan Unity karena *engine* ini menyediakan fleksibilitas tinggi dalam membangun antarmuka pengguna yang dinamis serta mendukung integrasi berbagai fitur interaktif secara *real-time*. Unity mendukung berbagai kebutuhan pengembangan mulai dari antarmuka pengguna, *scripting* berbasis C#, animasi karakter, hingga sistem multiplayer melalui integrasi dengan *third-party* [18]. Studi [19] dan [20] menunjukkan bahwa Unity memberikan performa lebih optimal dibandingkan *tools* lain dalam efisiensi penggunaan sumber daya pada perangkat kelas menengah, kecepatan kompilasi, dan fleksibilitas integrasi antarmuka *backend*. Selain itu, ketersediaan dokumentasi yang komprehensif, dukungan komunitas yang luas, serta kapabilitas dalam pembangunan aplikasi metaverse yang stabil dan terukur. Sementara itu, pengembangan Mallverse menerapkan pendekatan modular dengan enam fungsi utama sistem yaitu login dan register, multiplayer, chat, *runtime character switch*, ekspresi emosi pengguna (*player emotion*), serta fitur berbelanja. Struktur arsitektur sistem secara umum ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Arsitektur Pengembangan Mallverse.

Berdasarkan Gambar 1, setiap fitur dikembangkan menggunakan komponen Unity dan teknologi pendukung lainnya. Login dan register memanfaatkan UnityWebRequest dan UI Toolkit untuk autentikasi pengguna. Fitur multiplayer dan chat dibangun dengan Photon PUN dan sistem UI Unity. *Runtime character switch* menggunakan prefab dan Mecanim untuk mengganti avatar secara langsung. Player emotion diatur melalui Animator Controller, sedangkan fitur berbelanja dirancang dengan Canvas, ScrollView, dan event handler interaktif. Pendekatan ini mendukung pengembangan sistem yang efisien, fleksibel, dan mudah dikembangkan.

2.2. Evaluasi Performa Teknis

Evaluasi teknis difokuskan pada performa sistem Mallverse dalam mendukung eksplorasi virtual secara *real-time*, menggunakan dua parameter utama waktu muat (*load time*) dan *frame rate per second (FPS)*. Kedua indikator tersebut merepresentasikan metrik performa kunci yang berdampak langsung terhadap kualitas pengalaman pengguna dalam lingkungan tiga dimensi (3D). Studi terdahulu menunjukkan bahwa waktu muat yang lambat menurunkan kepuasan dan kepercayaan pengguna terhadap sistem [21], sedangkan *FPS* yang tidak stabil berdampak buruk pada persepsi kualitas visual dan pengalaman imersif dalam lingkungan virtual [22]. Nilai *FPS* pada setiap skenario direkam menggunakan Unity Profiler. Pengujian dilakukan pada perangkat laptop dengan spesifikasi minimum prosesor Intel i5, RAM 8GB, dan koneksi jaringan lokal. Pengujian teknis melibatkan 20 partisipan dalam dua skenario utama pengujian untuk mengevaluasi performa sistem dalam berbagai kondisi penggunaan. Skenario pertama menyimulasikan akses individual oleh masing-masing partisipan tanpa kehadiran pengguna lain secara bersamaan. Kondisi ini merepresentasikan *cold start* dan digunakan untuk mengevaluasi performa sistem pada beban minimal. Skenario kedua melibatkan dua kelompok partisipan, masing-masing terdiri atas sepuluh orang. Partisipan mengakses sistem secara simultan untuk menyimulasikan kondisi *warm start* dengan beban pengguna yang lebih tinggi.

2.2.1. Pengujian Load Time

Load time diukur berdasarkan waktu yang dibutuhkan sistem untuk memuat seluruh elemen utama lingkungan virtual, mulai dari akses awal pengguna hingga tampilan lobi dan toko siap dioperasikan. Pengujian ini dilakukan dalam dua skenario, yaitu:

- 1) Skenario individu
 Sebanyak 20 partisipan mengakses sistem satu per satu dalam kondisi *cold start*. *Load time* dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk keberadaan cache dan aktivitas pengguna lain. Dalam pengujian ini, setiap partisipan memulai akses dari halaman login dan diarahkan ke lingkungan utama. Durasi *load time* dicatat secara otomatis melalui mekanisme *logging* internal sistem dan diverifikasi dengan pengukuran manual menggunakan *stopwatch*.
- 2) Skenario kelompok (Kelompok A dan B)
 Dua kelompok yang masing-masing terdiri dari sepuluh partisipan mengakses sistem secara simultan dalam kondisi *warm start*, yakni saat sebagian aset telah termuat sebelumnya dan sistem menghadapi beban pengguna aktif secara bersamaan. *Load time* dihitung berdasarkan rata-rata waktu muat dari seluruh partisipan dalam masing-masing kelompok.

2.2.2. Pengujian *Load Time*

FPS merupakan indikator kelancaran visual dalam sistem 3D. Pengujian ini bertujuan menilai kemampuan sistem dalam mempertahankan frame rate yang stabil selama eksplorasi. *FPS* yang tinggi dan konsisten penting untuk menjaga pengalaman imersif dan mencegah lag visual. Evaluasi *FPS* dilakukan dengan membagi aktivitas pengguna ke dalam lima tahapan eksplorasi, yaitu (1) login dan pemuatan awal, (2) navigasi menuju ruang toko, (3) eksplorasi area toko dengan objek 3D, (4) interaksi dengan produk, dan (5) kembali ke lobi. Setiap tahapan merepresentasikan beban visual dan interaksi yang berbeda, sehingga memungkinkan identifikasi fluktuasi performa sistem secara lebih rinci dalam konteks penggunaan nyata.

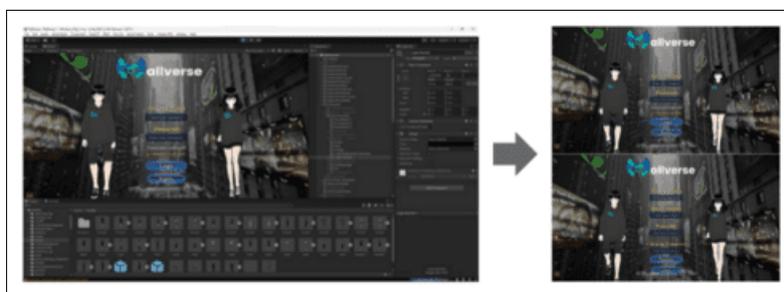
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengembangan Fitur Mallverse menggunakan Unity

Pengembangan Mallverse menerapkan pendekatan modular dengan mengelompokkan sistem ke dalam enam fungsi utama, yaitu login dan register, multiplayer, chat, *runtime character switch*, ekspresi emosi pengguna (*player emotion*), serta fitur berbelanja.

3.1.1. Login dan Register

Proses pengembangan dan hasil implementasi fitur login dan register pada Mallverse menggunakan Unity disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pengembangan Fitur Login dan Register menggunakan Unity.

Sistem login dan register dikembangkan dengan bahasa pemrograman PHP untuk menangani autentikasi pada sisi back-end. Proses autentikasi ini mencakup pemeriksaan kredensial yang dikirimkan dari sisi *client* ke *server*, serta pengelolaan data pengguna yang disimpan di dalam database MySQL. MySQL berfungsi sebagai media penyimpanan data akun pengguna yang melakukan pendaftaran di Mallverse. Di sisi *client*, proses registrasi dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman C# yang terintegrasi dalam Unity. Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan mekanisme verifikasi email. Saat pengguna melakukan registrasi, sistem secara otomatis mengirimkan email verifikasi ke alamat email yang dimasukkan oleh pengguna. Hal ini bertujuan untuk memastikan validitas akun dan mencegah penggunaan identitas fiktif atau palsu. Proses ini dilakukan melalui integrasi dengan layanan email *client*, yang berperan dalam memastikan bahwa hanya akun yang telah diverifikasi yang dapat mengakses dan menggunakan fitur utama dalam platform Mallverse.

3.1.2. Multiplayer

Proses pengembangan dan hasil implementasi fitur multiplayer pada Mallverse menggunakan Unity disajikan pada Gambar 3.

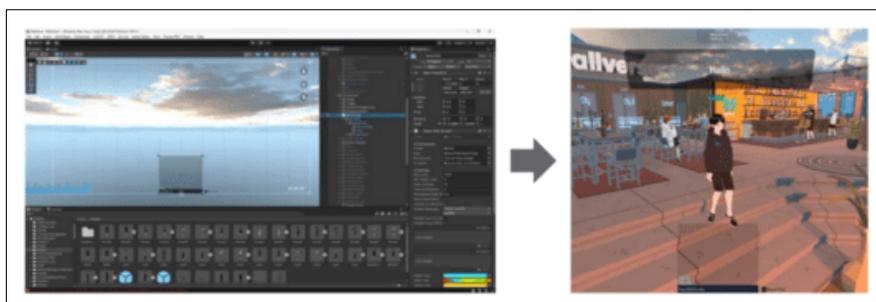


Gambar 3. Pengembangan Fitur Multiplayer Menggunakan Unity.

Sistem multiplayer pada Mallverse dikembangkan menggunakan Photon PUN Networking. Photon merupakan mesin *third-party networking* yang berfungsi untuk mengaktifkan fitur multiplayer dalam game. Photon menyediakan berbagai fitur dan alat bantu untuk membangun serta mengelola game multiplayer, termasuk matchmaking, jaringan yang andal, serta dukungan terhadap berbagai protokol komunikasi. Fitur multiplayer akan memfasilitasi dua pengguna yang sedang berada pada lokasi berbeda dalam lingkungan virtual, agar dapat melihat dan berinteraksi satu sama lain secara sinkron melalui jaringan internet. Implementasi ini memperkuat kesan kehadiran (*presence*) dalam ruang digital serta meningkatkan dimensi sosial dari pengalaman pengguna.

3.1.3. Chat

Proses pengembangan dan hasil implementasi fitur chat pada Mallverse menggunakan Unity disajikan pada Gambar 4.

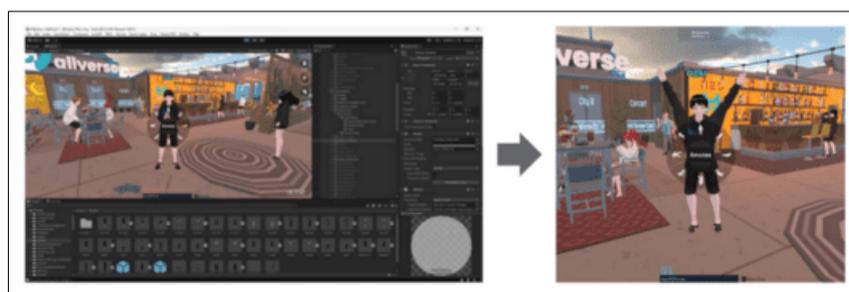


Gambar 4. Pengembangan Fitur Chat menggunakan Unity.

Mallverse menyediakan fitur chat untuk memungkinkan pengguna berkomunikasi satu sama lain di dalam lingkungan metaverse. Pesan yang dikirimkan akan muncul di atas kepala avatar pengguna ketika mereka mengetikkan teks pada kolom chat. Selain itu, riwayat percakapan sebelumnya dapat ditampilkan pada antarmuka GUI kolom chat.

3.1.4. Player Emotion

Proses pengembangan dan hasil implementasi fitur player emotion pada Mallverse menggunakan Unity disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Pengembangan Fitur Player Emotion Menggunakan Unity.

Proses pengembangan player emotion dilakukan melalui pembuatan animasi karakter yang disesuaikan, kemudian diintegrasikan ke dalam sistem melalui *scripting* menggunakan bahasa pemrograman C#. Integrasi ini bertujuan untuk menghubungkan animasi dengan karakter agar dapat dijalankan secara dinamis selama interaksi pengguna.

3.1.5. Runtime Character Switch

Proses pengembangan dan hasil implementasi fitur *runtime character switch* pada Mallverse menggunakan Unity disajikan pada Gambar 6.

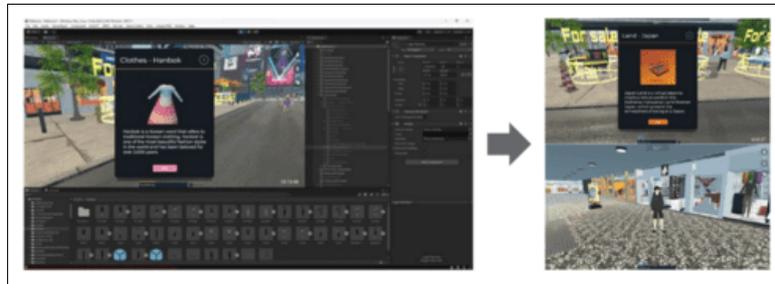


Gambar 6. Pengembangan Fitur *Runtime Character Switch* Menggunakan Unity.

Runtime character switch merupakan fitur yang memungkinkan pengguna untuk mengganti avatar atau karakter secara langsung di dalam lingkungan metaverse, tanpa perlu keluar dari sesi aplikasi. Fitur ini mendukung fleksibilitas interaksi dan personalisasi pengalaman pengguna dalam menjelajahi ruang virtual.

3.1.6. Berbelanja

Proses pengembangan dan hasil implementasi fitur berbelanja pada Mallverse menggunakan Unity disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Pengembangan Fitur Berbelanja Menggunakan Unity.

Mallverse menyediakan fitur belanja yang memungkinkan pengguna untuk melihat informasi produk melalui antarmuka interaktif. Saat pengguna memilih item tertentu, sistem akan menampilkan detail produk secara visual, termasuk deskripsi dan tombol aksi. Jika produk tersebut tersedia untuk pembelian eksternal, pengguna akan diarahkan ke halaman transaksi, baik dari situs internal Mallverse. Proses ini dirancang untuk mengintegrasikan pengalaman eksplorasi produk dengan sistem transaksi digital yang responsif terhadap jenis item yang dipilih.

3.2. Pengujian *Load Time* dan *FPS*

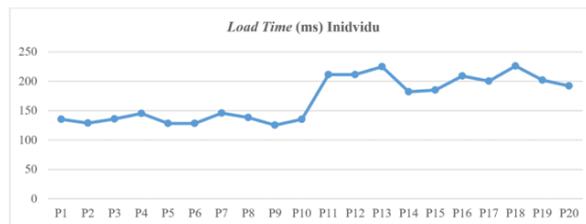
3.2.1. *Load Time*

Pengukuran *load time* dilakukan terhadap 20 partisipan yang mengikuti pengujian sistem Mallverse dalam dua skenario yaitu eksplorasi individu dan eksplorasi bersamaan (simultan). Setiap partisipan diberikan waktu untuk mengakses dan memuat antarmuka awal sistem hingga seluruh konten visualisasi tampil secara lengkap. Hasil pengukuran disajikan secara individu pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian *Load Time* Individu.

No.	Partisipan	Load Time (ms)	No.	Partisipan	Load Time (ms)
1	P1	135	11	P11	211
2	P2	129	12	P12	211
3	P3	136	13	P13	225
4	P4	145	14	P14	182
5	P5	128	15	P15	185
6	P6	128	16	P16	209
7	P7	146	17	P17	200
8	P8	138	18	P18	226
9	P9	125	19	P19	202
10	P10	135	20	P20	192

Berdasarkan Tabel 1, nilai *load time* bervariasi antar partisipan. Rentang nilai berkisar antara 125 ms hingga 226 ms, dengan nilai rata-rata sebesar 169 ms. Sebanyak 10 partisipan pertama menunjukkan waktu muat yang relatif cepat (≤ 150 ms), yang umumnya berasal dari skenario eksplorasi individu dengan beban sistem yang rendah. Sementara itu, 10 partisipan berikutnya mengalami waktu muat yang lebih tinggi, mayoritas di atas 180 ms, dengan nilai maksimum mencapai 226 ms seperti grafik yang disajikan pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik *Load Time* Penggunaan Individu.

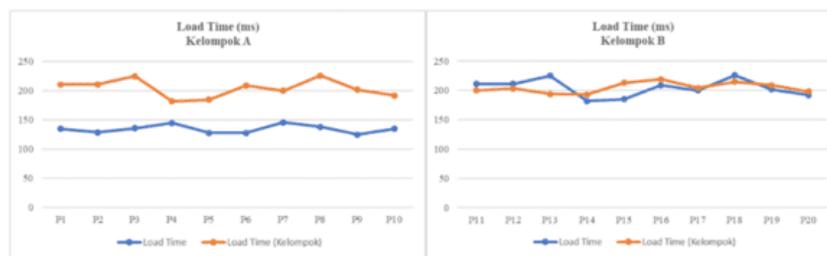
Visualisasi nilai *load time* dari 20 partisipan yang disajikan menggambarkan distribusi performa sistem berdasarkan urutan partisipan dengan perbedaan yang cukup kontras. Secara umum, partisipan P1 hingga P10 mencatat *load time* yang stabil di kisaran 125–145 ms. Sedangkan partisipan P11 hingga P20 mengalami lonjakan waktu muat dalam rentang 185–226 ms. Berdasarkan ambang batas performa yang ditetapkan dalam studi ini (ideal ≤ 200 ms; maksimum ≤ 500 ms), seluruh partisipan berhasil memuat sistem dalam rentang waktu yang masih tergolong responsif. Hanya tiga partisipan (P13, P18, dan P12) yang mendekati atau sedikit melampaui nilai ideal, namun tetap berada di bawah batas maksimum yang dapat diterima. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem Mallverse cukup stabil dan konsisten dalam menyajikan tampilan awal kepada pengguna kondisi akses individu (satu per satu). Variasi nilai *load time* yang muncul tetap berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk konteks penggunaan sistem virtual yang dikembangkan menggunakan Unity.

Pengujian eksplorasi bersamaan dilakukan terhadap dua kelompok, masing-masing terdiri dari 10 partisipan (Kelompok A dan Kelompok B) dengan mengakses dan menjelajahi sistem Mallverse secara simultan. Pengukuran dilakukan untuk mengetahui pengaruh beban pengguna terhadap waktu pemuatan sistem (*load time*), terutama saat sistem menangani aktivitas interaktif multi-pengguna dalam lingkungan 3D secara bersamaan. Hasil *load time* pada eksplorasi simultan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian *Load Time* Kelompok.

No.	Kelompok	Partisipan	Load Time (ms)	No.	Kelompok	Partisipan	Load Time (ms)
1	Kelompok A	P1	211	11	Kelompok B	P11	200
2		P2	211	12		P12	203
3		P3	225	13		P13	194
4		P4	182	14		P14	193
5		P5	185	15		P15	213
6		P6	209	16		P16	219
7		P7	200	17		P17	204
8		P8	226	18		P18	215
9		P9	202	19		P19	209
10		P10	192	20		P20	198

Tabel 2 menyajikan rincian nilai *load time* untuk masing-masing partisipan dalam dua kelompok tersebut. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai *load time* dalam Kelompok A berada pada rentang 182–226 ms, dengan nilai rata-rata sebesar 198 ms. Sedangkan Kelompok B menunjukkan rentang waktu 193–219 ms dan rata-rata 205 ms. Perbedaan *load time* untuk masing-masing kelompok disajikan dalam grafik pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik Perbandingan Load Time Penggunaan Kelompok.

Perbandingan antar kelompok menunjukkan bahwa Kelompok B cenderung mencatat rata-rata *load time* lebih tinggi dibandingkan Kelompok A dalam skenario dan infrastruktur pengujian yang sama. Kelompok A mengalami variasi yang lebih besar, sedangkan Kelompok B lebih stabil namun tetap mencatat waktu muat lebih lama dibanding eksplorasi individu. Perbedaan ini menunjukkan pengaruh signifikan dari jumlah pengguna aktif terhadap performa sistem, yang berkaitan dengan mekanisme caching aset, kondisi memori saat pengujian, serta beban latar belakang pada perangkat partisipan. Seluruh nilai *load time* tetap berada dalam kisaran responsif dan mendukung kelancaran interaksi dalam aplikasi metaverse berbasis konten 3D dinamis.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa skenario penggunaan individu dan kelompok memberikan dampak nyata terhadap performa sistem, khususnya pada aspek *load time*. Pada pengujian individu (*cold start*), partisipan mengakses sistem secara terpisah tanpa beban pengguna lain, menghasilkan waktu muat yang rendah dan konsisten, yang mencerminkan respons sistem yang optimal. Sebaliknya, pada pengujian kelompok (*warm start*), sepuluh partisipan mengakses sistem secara simultan melalui jaringan lokal yang telah dioptimalkan. Meskipun terjadi peningkatan waktu muat pada sebagian partisipan, nilainya tetap berada dalam ambang performa yang dapat diterima. Perbedaan ini menunjukkan bahwa arsitektur server dan stabilitas jaringan merupakan faktor kunci dalam mempertahankan performa sistem saat digunakan secara bersamaan.

3.2.2. FPS

Pengujian *frame rate per second (FPS)* secara individu dilakukan terhadap 20 partisipan yang mengakses sistem Mallverse secara terpisah dalam lima skenario utama yaitu pemuatan lingkungan awal (*FPS 1*), transisi ke ruang toko utama (*FPS 2*), eksplorasi area toko 3D (*FPS 3*), interaksi dengan produk (*FPS 4*), dan kembali ke area *lobby* (*FPS 5*). Hasil pengujian secara individu disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian FPS Individu.

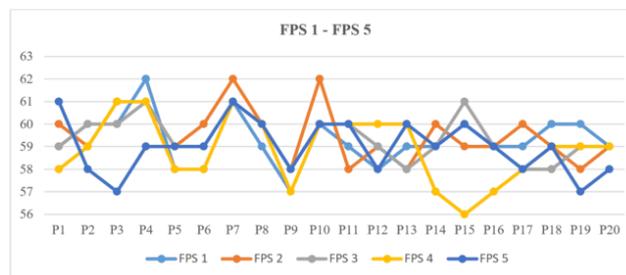
No.	Partisipan	FPS 1	FPS 2	FPS 3	FPS 4	FPS 5	No.	Partisipan	FPS 1	FPS 2	FPS 3	FPS 4	FPS 5
1	P1	59	60	59	58	61	11	P11	59	58	60	60	60
2	P2	60	59	60	59	58	12	P12	58	59	59	60	58
3	P3	60	61	60	61	57	13	P13	59	58	58	60	60
4	P4	62	61	61	61	59	14	P14	59	60	59	57	59
5	P5	58	59	59	58	59	15	P15	60	59	61	56	60
6	P6	58	60	59	58	59	16	P16	59	59	59	57	59
7	P7	61	62	61	61	61	17	P17	59	60	58	58	58
8	P8	59	60	60	60	60	18	P18	60	59	58	59	59
9	P9	57	58	58	57	58	19	P19	60	58	59	59	57
10	P10	60	62	60	60	60	20	P20	59	59	59	59	58

Berdasarkan Tabel 3 menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan performa visual yang stabil, dengan rata-rata *FPS* per partisipan berada di kisaran 58 hingga 61 *FPS*. Rata-rata keseluruhan untuk semua skenario konsisten pada angka 59–60 *FPS*. Konsistensi performa di seluruh skenario menunjukkan efisiensi proses *rendering*, navigasi, dan interaksi objek pada sisi klien. Sementara itu, pada skenario pertama ditemukan bahwa mayoritas partisipan mengalami *FPS* pada rentang optimal (59–61 *FPS*), dengan P4 mencatat nilai tertinggi yaitu 62 *FPS*. Sedangkan P9 menjadi satu-satunya partisipan dengan nilai *FPS* terendah di angka 57. Meskipun terdapat sedikit variasi antarpengguna, tidak ditemukan anomali signifikan yang menunjukkan gangguan performa atau delay saat proses awal dijalankan, serta menunjukkan bahwa stabilitas performa sistem dalam merender antarmuka awal secara *real-time*.

FPS pada skenario pertama, yaitu proses login dan pemuatan awal lingkungan virtual, tercatat stabil dalam rentang 57 hingga 62 *FPS*. Stabilitas ini menunjukkan bahwa beban grafis awal tidak signifikan, bahkan saat seluruh elemen sistem dimuat secara penuh dalam kondisi *cold start* tanpa dukungan caching. Konsistensi antar partisipan pada tahap ini krusial karena membentuk kesan awal terhadap kenyamanan dan kinerja sistem. Pada skenario kedua, saat partisipan berpindah dari area awal ke ruang toko utama, sistem mulai merender elemen grafis yang lebih kompleks dan menjalankan transisi antarruang. Stabilitas *FPS* pada kisaran 58–62 menunjukkan bahwa peningkatan beban komputasi tidak berdampak signifikan terhadap performa sistem. Temuan ini menunjukkan bahwa Mallverse memiliki kemampuan *rendering* yang efisien dan andal dalam mendukung skenario navigasi awal secara *real-time*.

FPS pada skenario ketiga menggambarkan performa sistem saat partisipan berada di area utama toko virtual yang dipenuhi objek 3D kompleks seperti rak dan produk visual. Fluktuasi *FPS* yang tercatat masih berada dalam ambang toleransi visual, menandakan efektivitas sistem dalam mempertahankan kelancaran eksplorasi meskipun dihadapkan pada kompleksitas objek yang tinggi. Temuan ini menunjukkan bahwa Mallverse dirancang dengan manajemen grafis yang efisien, sehingga mampu mempertahankan performa visual mendekati optimal meskipun dalam kondisi beban tinggi. Pada skenario keempat, *FPS* dicatat saat partisipan berinteraksi langsung dengan objek, termasuk memilih produk, memutar tampilan 3D, dan mengakses informasi tambahan. Hasil menunjukkan bahwa nilai *FPS* tetap dalam batas visual yang dapat diterima, tanpa menyebabkan jeda maupun gangguan. Hal ini menggambarkan bahwa efisiensi sistem dalam mengelola interaksi pengguna dan alokasi sumber daya secara dinamis.

FPS pada skenario kelima merepresentasikan performa sistem saat pengguna kembali dari area toko ke area *lobby*. Pada skenario ini, proses perpindahan mencakup pemuatan ulang elemen ruang dan potensi aktivasi efek transisi visual, seperti animasi kamera dan fade-out. Nilai *FPS* tercatat stabil pada rentang 57–61, dengan rata-rata 59 dan tanpa lonjakan ekstrem yang mengindikasikan bottleneck atau lag signifikan. Hasil ini menunjukkan konsistensi sistem dalam mengelola proses *rendering* dan manajemen memori, termasuk saat melakukan *unload* dari area padat ke area dengan kompleksitas visual lebih rendah.



Gambar 10. Grafik Perbandingan *FPS* Individu.

Gambar 9 memperlihatkan perbandingan nilai *FPS* dari lima skenario penggunaan di Mallverse, mulai dari login (*FPS* 1) hingga kembali ke area *lobby* (*FPS* 5). Grafik menunjukkan bahwa *FPS* konsisten di kisaran 57–62, mencerminkan performa *rendering* yang stabil dan layak untuk aplikasi 3D *real-time*. Puncak tertinggi *FPS* terlihat pada skenario awal (*FPS* 1 dan 2), khususnya pada partisipan P4, P7, dan P10, yang mencapai 62 *FPS*. Sebaliknya, penurunan paling signifikan terjadi pada *FPS* 4 saat interaksi produk, dengan *FPS* terendah 56 pada P15. Temuan ini mengindikasikan bahwa interaksi intensif dengan objek 3D memberikan beban *rendering* lebih tinggi dibanding navigasi biasa. Mallverse terbukti mampu menjaga *frame rate* yang konsisten selama eksplorasi individu, termasuk pada saat pengguna berinteraksi langsung dengan objek maupun berpindah antar-ruangan. Stabilitas ini mencerminkan kesiapan arsitektur client-side dan performa *rendering engine* dalam mendukung pengalaman virtual secara *real-time*. Grafik performa yang telah dianalisis juga menunjukkan bahwa sistem secara umum mampu memberikan pengalaman visual yang lancar dan stabil di seluruh tahapan penggunaan.

Sementara itu, pengujian *FPS* secara simultan dilakukan terhadap dua kelompok partisipan, yaitu Kelompok A dan Kelompok B, yang masing-masing terdiri dari 10 pengguna yang mengakses sistem Mallverse secara bersamaan. Setiap partisipan menjalankan lima skenario utama, mulai dari login awal (*FPS* 1) hingga kembali ke *lobby* (*FPS* 5). Hasil pengujian secara simultan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian *FPS* Penggunaan Kelompok.

No.	Kelompok	<i>FPS</i> 1	<i>FPS</i> 2	<i>FPS</i> 3	<i>FPS</i> 4	<i>FPS</i> 5	No.	Partisipan	<i>FPS</i> 1	<i>FPS</i> 2	<i>FPS</i> 3	<i>FPS</i> 4	<i>FPS</i> 5
1	Kelompok A	59	60	59	58	61	11	Kelompok B	59	58	60	60	60
2		60	59	60	59	58	12		58	59	59	60	58
3		60	61	60	61	57	13		59	58	58	60	60
4		62	61	61	61	59	14		59	60	59	57	59
5		58	59	59	58	59	15		60	59	61	56	60
6		58	60	59	58	59	16		59	59	59	57	59
7		61	62	61	61	61	17		59	60	58	58	58
8		59	60	60	60	60	18		60	59	58	59	59
9		57	58	58	57	58	19		60	58	59	59	57
10		60	62	60	60	60	20		59	59	59	59	58

Berdasarkan data tabel, rata-rata *FPS* keseluruhan berada di kisaran 46–47 *FPS*. Kelompok A mencatat *FPS* sedikit lebih tinggi dibanding Kelompok B di hampir semua skenario. P1 dan P3 dari Kelompok A mencapai 53 dan 51 *FPS*, sedangkan sebagian besar partisipan Kelompok B hanya mencatat 41–48 *FPS*. Secara umum, Kelompok A menunjukkan fluktuasi dalam rentang 44–53 *FPS*, sementara Kelompok B cenderung konsisten lebih rendah pada 41–48 *FPS*. Penurunan paling dominan terjadi pada partisipan ke-5 dan ke-10 dari Kelompok B yang hanya mencatat *FPS* sekitar 41–42.



Gambar 11. Grafik Perbandingan *FPS* Penggunaan Kelompok.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa Mallverse tetap mampu menjaga performa yang stabil dalam skenario akses simultan, meskipun terdapat penurunan dibandingkan pengujian individu. Grafik perbandingan *FPS* antar kelompok memperlihatkan bahwa Kelompok A memiliki nilai lebih tinggi namun fluktuatif, sementara Kelompok B lebih rendah dan stabil. Pola ini mengarah pada pengaruh mekanisme caching dan dampak beban pengguna paralel. Meski terjadi penurunan, nilai *FPS* tetap berada di atas ambang kenyamanan visual (>40 *FPS*), menandakan sistem masih layak digunakan untuk aplikasi 3D interaktif. Temuan ini menegaskan bahwa Mallverse memiliki fondasi arsitektur yang kuat, meskipun optimalisasi pengelolaan sumber daya dan jaringan tetap dibutuhkan untuk skenario multipengguna berskala besar. Selain itu, hasil pengujian menunjukkan bahwa Unity memiliki kapabilitas teknis yang kuat untuk mendukung pengembangan sistem metaverse seperti Mallverse, baik dalam skenario individu maupun multipengguna. Stabilitas performa dalam berbagai tahap eksplorasi virtual menegaskan bahwa Unity mampu menangani lingkungan 3D *real-time* secara efisien. Dukungan *scripting* modular berbasis C#, manajemen objek yang optimal, dan alat seperti Unity Profiler memberi fleksibilitas tinggi bagi pengembang dalam evaluasi performa. Meski demikian, pengujian juga mengindikasikan perlunya optimalisasi lebih lanjut, terutama pada skenario akses simultan. Strategi seperti pengurangan *overdraw*, penggunaan *baked lighting*, dan *asynchronous scene loading* dapat meningkatkan efisiensi sumber daya serta mendukung skalabilitas sistem.

3.3. Pembahasan

Hasil pengujian performa teknis Mallverse menunjukkan bahwa platform ini mampu mempertahankan waktu muat dan kelancaran visual yang stabil, baik pada skenario individu maupun kelompok. Rata-rata *load time* untuk akses individu tercatat di bawah 210 milidetik, sementara pada skenario kelompok sedikit meningkat namun tetap dalam batas wajar, yakni di bawah 230 milidetik. Hal ini mencerminkan kemampuan sistem dalam beradaptasi terhadap beban simultan, didukung oleh optimasi jaringan dan mekanisme caching. Pendekatan *warm start* pada skenario kelompok turut berkontribusi

dalam menjaga kestabilan, meskipun terdapat fluktuasi minor antar partisipan. Dari sisi visual, rata-rata *FPS* pada skenario individu mendekati atau melebihi 50 *FPS*, dengan minimum di atas 40 *FPS*, mencerminkan kualitas interaksi yang baik di lingkungan virtual. Pada skenario kelompok, terjadi sedikit penurunan *FPS* saat interaksi paralel, namun tetap dalam batas toleransi antarmuka yaitu 30–40 *FPS*. Secara keseluruhan, kinerja ini menunjukkan bahwa Unity mampu menangani proses *rendering* multipengguna dengan aset 3D kompleks secara efisien dan responsif. Capaian ini menggambarkan bahwa Unity mampu menyajikan pengalaman visual yang baik dan responsif, serta memenuhi standar minimum kenyamanan dalam penggunaan aplikasi *real-time* berbasis 3D. Temuan ini sejalan dengan berbagai studi yang menegaskan keandalan Unity dalam konteks aplikasi imersif. Studi [23] menunjukkan bahwa Unity berhasil menghadirkan antarmuka yang intuitif dan responsif pada aplikasi navigasi berbasis augmented reality (AR), dengan skor tinggi dalam evaluasi kegunaan (*usability*). Selain itu Unity mendukung visualisasi 3D *real-time* yang membuat interaksi pengguna di lingkungan virtual menjadi lebih nyaman dan efisien [24].

Kinerja sistem menunjukkan peran strategis Unity dalam menyediakan infrastruktur modular dan terintegrasi untuk pengembangan fitur interaktif secara efisien. Hal ini didukung oleh kemampuan Unity dalam mengelola fitur-fitur kompleks melalui *scripting C#* dan koneksi *backend* menggunakan PHP dan MySQL yang dilengkapi verifikasi email untuk keamanan pengguna. Fitur login dan register dikembangkan menggunakan *scripting C#* di sisi klien serta PHP dan MySQL di sisi server, dilengkapi verifikasi email untuk meningkatkan keamanan dan validitas pengguna. Fitur multipengguna memanfaatkan Photon PUN Networking guna memungkinkan interaksi sinkron secara *real-time* antar pengguna dari lokasi berbeda, sehingga memperkuat aspek *presence* dalam lingkungan virtual. Dimensi sosial platform Mallverse diperkaya melalui fitur chat dan *player emotion*, yang memungkinkan pesan teks tampil kontekstual di atas avatar serta menampilkan ekspresi emosional melalui animasi. Fitur *runtime character switch* memungkinkan pengguna mengganti avatar tanpa keluar dari sesi, mencerminkan fleksibilitas Unity dalam *runtime asset instantiation* dan mendukung personalisasi tanpa mengganggu interaksi. Fitur belanja terintegrasi melalui antarmuka interaktif yang menyajikan deskripsi produk dan tautan ke sistem transaksi eksternal, memperlihatkan kemampuan Unity dalam menciptakan pengalaman belanja virtual yang imersif dan mendukung konsep *embodied commerce (e-commerce)*. Hal ini sejalan dengan temuan [25] yang menekankan bahwa pengalaman berbelanja berbasis teknologi imersif meningkatkan kenyamanan dan efisiensi pengambilan keputusan konsumen.

Sementara itu, temuan studi ini juga menegaskan bahwa Unity memiliki kapabilitas teknis yang kuat untuk memuat dan mengelola aset secara dinamis tanpa mengganggu interaksi pengguna. Kemampuan ini meningkatkan fleksibilitas sistem dan memungkinkan personalisasi yang lebih tinggi selama eksplorasi virtual. Integrasi antara antarmuka belanja, fitur interaktif, dan sistem transaksi eksternal menunjukkan bahwa pendekatan ini dapat mewujudkan konsep *e-commerce* secara fungsional di lingkungan metaverse. Secara keseluruhan, hasil studi menunjukkan bahwa pengembangan toko virtual berbasis metaverse harus memperhatikan aspek teknis dan adaptif guna mendukung pengalaman pengguna secara optimal.

4. Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengevaluasi *Mallverse*, sebuah platform toko virtual berbasis metaverse yang menawarkan pengalaman belanja digital secara imersif, interaktif, dan adaptif terhadap preferensi pengguna. Platform ini dikembangkan menggunakan Unity sebagai *game engine* utama, dengan integrasi berbagai fitur utama seperti autentikasi pengguna (login dan register), konektivitas multipengguna (multiplayer), sistem komunikasi (chat), ekspresi avatar (*player emotion*), pergantian karakter dinamis (*runtime character switch*), serta antarmuka belanja berbasis interaksi visual. Hasil pengujian teknis menunjukkan bahwa performa sistem secara keseluruhan berada dalam batas optimal dan dapat diterima. Pada skenario individu, *Mallverse* mampu mempertahankan *load time* di bawah 210 ms dan *FPS* rata-rata di atas 55, yang menjamin respons sistem yang cepat dan tampilan visual yang mulus. Dalam skenario eksplorasi simultan oleh beberapa pengguna (kelompok), sistem menunjukkan penurunan performa yang relatif kecil namun tetap berada dalam batas toleransi. Nilai *FPS* minimum tercatat di atas 40, sementara waktu muat (*load time*) rata-rata tetap di bawah 230 milidetik. Temuan ini mengindikasikan bahwa Unity memiliki kemampuan yang andal dalam mengelola interaksi multipengguna secara *real-time* tanpa menyebabkan degradasi performa yang signifikan.

Secara keseluruhan, studi ini menunjukkan bahwa Unity tidak hanya mumpuni dalam menyajikan lingkungan virtual 3D yang *realistic*, tetapi juga mampu mendukung pengembangan sistem metaverse yang fungsional, modular, dan dapat diskalakan. Temuan ini menegaskan bahwa keberhasilan implementasi platform metaverse bergantung pada sinergi antara performa teknis yang optimal dan desain fitur yang berorientasi pada pengguna. Temuan ini menegaskan bahwa keberhasilan implementasi platform metaverse

bergantung pada sinergi antara performa teknis yang optimal dan desain fitur yang berorientasi pada pengguna. Mallverse merepresentasikan inisiatif strategis dalam transformasi digital sektor ritel dan edukasi berbasis interaksi virtual. Platform ini membuka peluang untuk riset lanjutan yang mencakup optimalisasi performa sistem, evaluasi longitudinal terhadap pengalaman pengguna, serta integrasi sistem pembayaran digital secara lebih komprehensif dalam ekosistem metaverse.

Daftar Pustaka

- [1] M. G. Abdulai, S. K. Dary, dan P. B. Domanban, "Adoption of digital payment platforms and trade credit activities among informal firms in Ghana," *Heliyon*, vol. 10, no. 11, hlm. e32302, Jun 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e32302.
- [2] Md. S. Dihan *dkk.*, "Digital twin: Data exploration, architecture, implementation and future," *Heliyon*, vol. 10, no. 5, hlm. e26503, Mar 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e26503.
- [3] W. Li, Mao ,Yuanyi, dan L. and Zhou, "The Impact of Interactivity on User Satisfaction in Digital Social Reading: Social Presence as a Mediator," *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 37, no. 17, hlm. 1636–1647, Okt 2021, doi: 10.1080/10447318.2021.1898850.
- [4] A. M. Al-Ghaili *dkk.*, "A Review of Metaverse's Definitions, Architecture, Applications, Challenges, Issues, Solutions, and Future Trends," *IEEE Access*, vol. 10, hlm. 125835–125866, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3225638.
- [5] P. W. Wijayanto, H. Thamrin, A. Haetami, S. Mustoip, dan U. Y. Oktiawati, "The Potential of Metaverse Technology in Education as a Transformation of Learning Media in Indonesia," *Jurnal Kependidikan: Jurnal Hasil Penelitian dan Kajian Kepustakaan di Bidang Pendidikan, Pengajaran dan Pembelajaran*, vol. 9, no. 2, hlm. 396–407, Mei 2023, doi: 10.33394/jk.v9i2.7395.
- [6] M. U. Gusteti, J. Jamna, dan S. Marsidin, "Pemikiran Digitalisme dan Implikasinya pada Guru Penggerak di Era Metaverse," *Jurnal Basicedu*, vol. 7, no. 1, Art. no. 1, Jan 2023, doi: 10.31004/basicedu.v7i1.4417.
- [7] R. H. Alinata dan M. Marsudi, "Pemanfaatan Roblox sebagai Media Promosi Sekolah Metaverse SMP Negeri 3 Sumenep: Using Roblox As A Promotional Media Metaverse School SMP Negeri 3 Sumenep," *MALCOM: Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science*, vol. 4, no. 1, Art. no. 1, 2024, doi: 10.57152/malcom.v4i1.1011.
- [8] M. A. N. Fauzan dan E. S. Priowirjanto, "Metaverse dalam Pembuatan dan Penggunaannya: Kegiatan Metaverse di Bidang Bisnis Online dan Pengaturannya di Indonesia," *COMSERVA: Jurnal Penelitian dan Pengabdian Masyarakat*, vol. 3, no. 1, Art. no. 1, Mei 2023, doi: 10.59141/comserva.v3i1.739.
- [9] D. Chakraborty, A. K. Kar, dan D. Dennehy, "Metaverse in e-commerce industry: current trends and future prospects," *Electron Commer Res*, Agu 2023, doi: 10.1007/s10660-023-09754-w.
- [10] S. Mystakidis, "Metaverse," *Encyclopedia*, vol. 2, no. 1, Art. no. 1, Mar 2022, doi: 10.3390/encyclopedia2010031.
- [11] S. Handoyo, "Purchasing in the digital age: A meta-analytical perspective on trust, risk, security, and e-WOM in e-commerce," *Heliyon*, vol. 10, no. 8, hlm. e29714, Apr 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e29714.
- [12] Y. K. Dwivedi *dkk.*, "Metaverse beyond the hype: Multidisciplinary perspectives on emerging challenges, opportunities, and agenda for research, practice and policy," *International Journal of Information Management*, vol. 66, hlm. 102542, Okt 2022, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2022.102542.
- [13] S. Periyasami dan A. P. Periyasamy, "Metaverse as Future Promising Platform Business Model: Case Study on Fashion Value Chain," *Businesses*, vol. 2, no. 4, Art. no. 4, Des 2022, doi: 10.3390/businesses2040033.
- [14] E. Kromidha, B. Taheri, S. Kraus, dan S. Malodia, "The metaverse as an opportunity for entrepreneurship and innovation," *The International Journal of Entrepreneurship and Innovation*, vol. 26, no. 1, hlm. 3–11, Feb 2025, doi: 10.1177/14657503251314627.
- [15] M. Al-kfairy, A. Alomari, M. Al-Bashayreh, O. Alfandi, dan M. Tubishat, "Unveiling the Metaverse: A survey of user perceptions and the impact of usability, social influence and interoperability," *Heliyon*, vol. 10, no. 10, hlm. e31413, Mei 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e31413.
- [16] G. Wang, Zhang ,Zhewei, Nandhakumar ,Joe, dan N. and Manoharan, "Everyday Metaverse: The Metaverse as an Integral Part of Everyday Life," *Journal of Management Information Systems*, vol. 42, no. 1, hlm. 310–342, Jan 2025, doi: 10.1080/07421222.2025.2455772.
- [17] D. Buhalis, D. Leung, dan M. Lin, "Metaverse as a disruptive technology revolutionising tourism management and marketing," *Tourism Management*, vol. 97, hlm. 104724, Agu 2023, doi: 10.1016/j.tourman.2023.104724.

-
- [18] A. Indraprastha dan M. Shinozaki, "The Investigation on Using Unity3D Game *Engine* in Urban Design Study," *Journal of ICT Research and Applications*, vol. 3, no. 1, Art. no. 1, 2009, doi: 10.5614/itbj.ict.2009.3.1.1.
- [19] A. Hussain, H. Shakeel, F. Hussain, N. Uddin, dan T. Ghouri, "Unity Game Development *Engine*: A Technical Survey," *University of Sindh Journal of Information and Communication Technology*, vol. 4, Okt 2020.
- [20] M. Foxman, "United We Stand: Platforms, Tools and Innovation With the Unity Game *Engine*," *Social Media + Society*, vol. 5, no. 4, hlm. 2056305119880177, Okt 2019, doi: 10.1177/2056305119880177.
- [21] M. Hatami, Q. Qu, Y. Chen, H. Kholidy, E. Blasch, dan E. Ardiles-Cruz, "A Survey of the *Real-Time* Metaverse: Challenges and Opportunities," *Future Internet*, vol. 16, no. 10, Art. no. 10, Okt 2024, doi: 10.3390/fi16100379.
- [22] R. Grande, J. Albusac, D. Vallejo, C. Glez-Morcillo, dan J. J. Castro-Schez, "Performance Evaluation and Optimization of 3D Models from Low-Cost 3D Scanning Technologies for Virtual *Reality* and Metaverse E-Commerce," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 14, Art. no. 14, Jan 2024, doi: 10.3390/app14146037.
- [23] T. Marian-Vladut, T. C. Octavian, dan P. Paul, "Evaluating User Acceptance and Usability of AR-Based Indoor Navigation in a University Setting: An Empirical Study," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, vol. 16, no. 4, Art. no. 4, Mar 2025, doi: 10.14569/IJACSA.2025.0160406.
- [24] N. Reski, A. Alissandrakis, dan A. Kerren, "Designing a 3D gestural interface to support user interaction with *time*-oriented data as immersive 3D radar charts," *Virtual Reality*, vol. 28, no. 1, hlm. 30, Jan 2024, doi: 10.1007/s10055-023-00913-w.
- [25] B. Xu, S. Guo, E. Koh, J. Hoffswell, R. Rossi, dan F. Du, "ARShopping: In-Store Shopping Decision Support Through Augmented *Reality* and Immersive Visualization," dalam *2022 IEEE Visualization and Visual Analytics (VIS)*, Okt 2022, hlm. 120–124. doi: 10.1109/VIS54862.2022.00033.